

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Magnetická pole v okolí elektrizovaných drah**  
**Magnetic Field in the Vicinity of DC Electric Railways**

**Ostrava, 2010**

**Bc. Tomáš Kotrle**

## **Prohlášení**

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.  
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

.....  
*Bc. Tomáš Kotrle*

*Datum odevzdání diplomové práce: 7. 5. 2010*

## **Poděkování**

Chtěl bych touto cestou velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Ing. Josefu Palečkovi CSc. za cenné rady, konzultace a připomínky spojené s vypracováním mého úkolu.

Zároveň bych rád poděkoval panu Ing. Martinu Markovi Ph.D. za pomoc a rady týkající se laboratorního měření a panu Ing. Petru Kačorovi Ph.D. za pomoc a rady týkající se počítačového softwaru ANSYS.

## **Abstrakt**

Předmětem této diplomové práce je vyšetření magnetického pole v okolí elektrizovaných drah. Měření bylo provedeno v laboratoři magnetických měření na VŠB – TU Ostrava na části kolejnice UIC 60 o délce 1,5 m. V první části bylo zapotřebí zjistit materiálové vlastnosti měřené kolejnice pomocí systému Remagraph. Magnetické pole v okolí kolejnice bylo vyšetřeno pomocí velmi přesného přístroje Gaussmetru Bell 5100 model 5180 při průchodu proudů 100 A, 200 A, 300 A, 400 A, 500 A a 550 A. K převedení naměřených hodnot do grafické podoby byl použit software LabView. Dále bylo zapotřebí výsledky nasimulovat a porovnat s naměřenými hodnotami. Volba padla na software ANSYS 10.0. Program je založen na metodě konečných prvků a patří k nejlepším FEM výpočetním systémům. Naměřené a nasimulované výsledky jsou současně zobrazeny a porovnány v mapách rozložení magnetické indukce.

## **Klíčová slova**

magnetické pole, kolejnice UIC 60, systém Remagraph, Gaussmetr Bell 5100 model 5180, LabView, ANSYS, metoda konečných prvků, FEM systém, magnetická indukce

## **Abstrakt**

The subject of this thesis is the examination of the magnetic field in the vicinity of electrified railways. Measurements were performed in the laboratory magnetic measurements at VŠB - Technical University of UIC 60 rail section with a length of 1.5 m. In the first part was needed to determine the material properties measured using the rail system Remagraph. Magnetic field around the rail were examined using highly accurate instruments Gaussmetru Bell 5100 Model 5180 for passing a current of 100 A, 200 A, 300 A, 400 A, 500 A and 550 A. To convert the measured values in graphic form was used LabView software. It also needed to simulate and compare the results with measured values. The choice fell on the software ANSYS 10.0. The program is based on finite element method and the FEM is one of the best computer systems. The measured and simulated results are simultaneously displayed and compared the distribution maps of magnetic induction.

## **Key words**

magnetic field, rails UIC 60, system Remagraph, Gaussmetr Bell 5100 model 5180, LabView, ANSYS, finite element method, FEM system, magnetic induction

## Seznam použitých symbolů a zkratek

B – magnetická indukce (T)  
BH – magnetovací charakteristika  
B<sub>x</sub> – x-ová složka magnetické indukce  
B<sub>y</sub> – y-ová složka magnetické indukce  
ČD – České dráhy  
ČR – Česká republika  
DC – stejnosměrné napájení  
EMP – elektromagnetické pole  
EU – Evropská unie  
F – síla (N)  
FEM – metoda konečných elementů  
H – intenzita magnetického pole (Am<sup>-1</sup>)  
I – proud (A)  
MKD – metoda konečných diferencí  
MKP – metoda konečných prvků  
M<sub>mech</sub> – mechanický moment  
PC – stolní počítač  
S – plocha (m<sup>2</sup>)  
T – čas (s)  
Tab. – tabulka  
VŠB – TUO – Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava  
WHO – světová zdravotnická organizace  
aj. – a jiné  
atd. – a tak dále  
d – vzdálenost mezi vodiči (m)  
l – délka vodiče (m)  
např. – například  
tzn. – to znamená  
Φ – magnetický tok (Wb)  
μ - relativní permeabilita  
μ<sub>0</sub> – permeabilita vakua (Hm<sup>-1</sup>)

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>6</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>
<b>2 MAGNETICKÁ POLE V OKOLÍ VODIČŮ.....</b>	<b>2</b>
2.1 ZÁKLADNÍ MAGNETICKÉ VELIČINY .....	2
2.1.1 Magnetická indukce.....	2
2.1.2 Magnetický tok .....	3
2.1.3 Intenzita magnetického pole.....	4
2.1.4 Magnetický moment.....	4
2.1.5 Magnetomotorická síla, magnetické napětí a potenciál .....	6
2.2 AMPÉRŮV ZÁKON .....	8
2.2.1 Ampérův zákon celkového proudu.....	8
2.2.2 Ampérův zákon pro sílu v magnetickém poli.....	8
2.2.3 Ampérův zákon pro sílu mezi dvěma vodiči.....	9
2.3 BIOTŮV-SAVARTŮV ZÁKON.....	10
2.4 MAGNETICKÉ POLE V OKOLÍ PŘÍMÉHO VODIČE .....	10
2.5 MAGNETICKÉ POLE V OKOLÍ VÍCE VODIČŮ .....	11
<b>3 MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ VYBRANÉ KOLEJNICE .....</b>	<b>14</b>
3.1 SYSTÉM REMAGRAPH C-500 .....	14
3.2 STACIONÁRNÍ MEGNETOVACÍ CHARAKTERISTIKA.....	16
3.3 BH CHARAKTERISTIKY .....	17
<b>4 MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH POLÍ V BLÍZKÉM OKOLÍ KOLEJNICE .....</b>	<b>18</b>
4.1 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE POMOCÍ MĚŘENÍ .....	18
4.1.1 Blokové schéma měření a postup měření .....	19
4.1.2 Kolejnice UIC 60 (60 E1).....	21
4.1.3 Zdroj.....	22
4.1.4 Zařízení pro měření magnetického pole .....	23
4.2 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE POMOCÍ VÝPOČTU .....	26
4.2.1 Metoda konečných diferencí.....	26
4.2.2 Metoda konečných prvků.....	28
4.2.3 Diferenciální model daného problému.....	28
<b>5 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT .....</b>	<b>30</b>
5.1 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT POMOCÍ PROGRAMU LABVIEW .....	30
5.2 VYHODNOCENÍ VYPOČTENÝCH HODNOT POMOCÍ PROGRAMU ANSYS .....	31
5.3 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT.....	35
5.3.1 Porovnání hodnot pro proud 100A.....	35
5.3.2 Porovnání hodnot pro proud 200A.....	36
5.3.3 Porovnání hodnot pro proud 300A.....	37
5.3.4 Porovnání hodnot pro proud 400A.....	38
5.3.5 Porovnání hodnot pro proud 500A.....	39
5.3.6 Porovnání hodnot pro proud 550A.....	40
5.4 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	41
5.5 VLIV MAGNETICKÉHO POLE NA ČLOVĚKA.....	41
5.5.1 Účinky magnetického pole na lidský organizmus.....	41

5.5.2 Maximální typické expozice obyvatelstva EMP dle světové zdravotnické organizace WHO  
42

6	ZÁVĚR.....	44
7	POUŽITÁ LITERATURA .....	0
8	SEZNAM PŘÍLOH .....	1

# 1 Úvod

Energetika zasahuje do mnoha odvětví a oborů dnešní vědy a techniky. Je součástí našeho běžného života, a dá se konstatovat, že bez ní bychom se v dnešní uspěchané a hektické době jen těžko obešli. Většina lidí si pod pojmem energetika představí výrobu a přenos energie od zdroje ke koncovému uživateli. Jen málokdo si ale uvědomí, že energetika se velmi využívá v dopravě, a to především v dopravě železniční.

U nás v České republice máme velmi rozsáhlou železniční síť, u níž v posledních letech došlo a následně dochází k modernizaci hlavních koridorů. Nejedná se pouze o trolejové vedení, k provozu takové sítě je zapotřebí spousta napájecích stanic, měníren, transformoven, zabezpečovacího zařízení, pro jejichž funkci je zapotřebí spousta elektrické energie. Tato železniční síť má dvě části co se napájení týče. Část železnice je napájena 25 kV/50 Hz převážně jím ČR a dále 3 kV DC, která se nachází především na severní Moravě a severních Čechách.

Úkolem této diplomové práce na téma: Magnetické pole v okolí elektrizovaných drah bylo zjistit velikost a tvar magnetického pole v okolí kolejnice, která je napájena stejnosměrným elektrickým proudem. Tato práce navazuje na řešení projektu Grantové agentury České republiky 103/05/0660 u níž se řešitelé zabývali také řešením magnetického pole při průchodu stejnosměrného proudu, ale pouze pro nízké hodnoty, řádově desítky ampér (max. hodnota 40A). Tato diplomová práce řeší podobný problém, ale s tím rozdílem, že k napájení je použit zdroj schopný dodávat stejnosměrný proud o hodnotách řádově stovky ampér (max. hodnota 550A).

Magnetické pole má všeobecně vliv nejen na různá technická zařízení jako výpočetní technika, sdělovací technika a elektronika, ale i na živé organizmy a lidské tělo. Magnetické pole má vliv na proudění krve, tlak a celkovou pohodu člověka. U lidí pracujících v blízkosti magnetického pole mohou nastat různé zdravotní komplikace jako například: změna reakční doby, změny sedimentace, stavy úzkosti aj... Proto je zapotřebí pole analyzovat a přispět k vytvoření norem limitujících intenzitu magnetických polí a délku pobytu v těchto polích.

Práce je přehledně a strukturovaně členěna do čtyř hlavních kapitol. První kapitola pojednává o magnetizmu všeobecně. Jsou zde vysvětleny základní magnetické veličiny a zákony. V další kapitole je popis měření a zjištění magnetických vlastností měřené kolejnice pomocí velmi přesného systému Remagraph. Zjištění magnetických vlastností a především BH charakteristiky materiálu je velmi důležité i pro další vyhodnocení výsledků pomocí softwaru. Kapitola s názvem: měření magnetických polí v blízkém okolí obsahuje obsáhlý popis měření, použitých měřících přístrojů aj... Naměřené a dále upravené výsledky pomocí programu LabView bylo zapotřebí porovnat s vypočtenými hodnotami a zjistit jak moc se liší teoretické výsledky s výsledky praktickými. Proto je zde dále popsána metoda konečných prvků a metoda konečných diferencí sloužící k analýze magnetického pole pomocí výpočtu na PC. K tomuto účelu byl zvolen software ANSYS 10.0, založený na metodě konečných prvků. Výsledky porovnání praktického měření v laboratoři a pomocí numerického výpočtu jsou zhodnoceny v poslední kapitole.

Výsledky této diplomové práce byly prezentovány na konferenci Electric Power Engineering konající se 4.5. až 6. 5. 2010 v Brně.



## 2 Magnetická pole v okolí vodičů

### 2.1 Základní magnetické veličiny

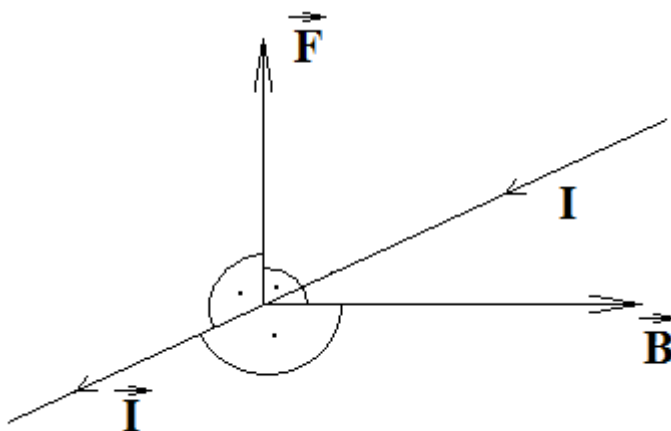
Mezi základní veličiny popisující magnetické pole a magnetické vlastnosti látek patří:

- 1) Magnetická indukce
- 2) Magnetický tok
- 3) Intenzita magnetického pole
- 4) Magnetický moment
- 5) Magnetomotorická síla, magnetické napětí a potenciál

#### 2.1.1 Magnetická indukce

Magnetická indukce  $B$  je vektorová veličina, definovaná silou působící na vodič, jímž prochází elektrický proud  $I$ . Podle Obr. 2.1 je:

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (\text{N; A, m, T}) \quad (1)$$



Obr. 2.1 Definice magnetické indukce

Měří se nejčastěji modul  $B$ , nebo některá z jeho složek. Jednotkou magnetické indukce je 1 T (Tesla). Je to indukce homogenního pole, v němž na přímý vodič s délkou  $l = 1\text{ m}$  působí síla 1 N, je-li vodič kolmý ke směru  $B$  a prochází jím proud 1 A. Indukci lze též vyjádřit pomocí magnetického toku,  $1\text{ T} = 1\text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2} = 1\text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ . V soustavě CGSM byl jednotkou indukce  $1\text{ G}(\text{Gauss}) = 10^{-4}\text{ T}$ . [3]

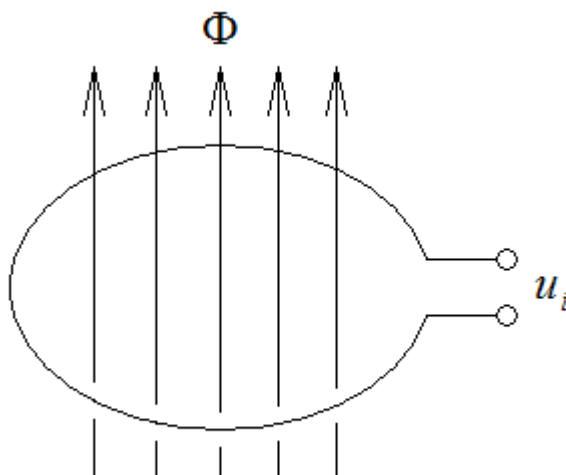
Jednotka magnetické indukce je realizována buď cívkovými etalony, nebo přímým měřením pomocí nukleární magnetické rezonance. Cívkové etalony jsou jednovrstvé cívky, vinuté na křemenné kostře, u nichž lze indukci ve středu vypočítat z rozměrů a proudu. Těmito etalony lze dosáhnout indukce  $B = 10^{-3}\text{ T}$  s nejistotou  $10^{-3}\%$  až  $10^{-4}\%$ . Metody nukleární magnetické rezonance provádějí měření indukce na měření kmitočtu, daného rezonancí atomových jader tekutin v magnetickém poli.

Rozsah měření hodnot indukce je velmi široký, přibližně od  $10^{-14}$  T do  $10^2$  T. Oblasti v okolí obou krajních hodnot ovšem vyžadují speciální uspořádání pro měření i generování takových magnetických polí. V běžné praxi se setkáme s indukcí ve feromagnetiku, která dosahuje hodnot 1,5 T až 2 T. Zemské magnetické pole v našich zeměpisných šířkách má hodnotu  $40 \mu\text{T}$ , vodorovná složka je  $18 \mu\text{T}$ . [3]

### 2.1.2 Magnetický tok

Magnetický tok je skalární veličina definovaná napětím  $u_i$  indukovaným v závitě při časové změně toku  $\Phi$  podle vztahu:

$$u_i = \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{V; Wb, s}) \quad (2)$$



Obr. 2.2 Závit obepínající magnetický tok

Magnetickému toku 1 Wb (Weber) odpovídá indukované napětí 1V, které podle Obr. 2.2 vznikne v závitě obepínajícím tok při rovnoměrném poklesu toku z jednotkové hodnoty na nulu v čase  $t = 1\text{s}$ . Přiřazení jednotlivých veličin je patrné z Obr. 2.2. Tok lze také definovat pomocí vztahu[3]:

$$\Phi = \iint_S B dS = \iint_S B_n dS \quad (\text{Wb; T, m}^2) \quad (3)$$

Kde  $B_n$  je složka  $B$  kolmá k ploše  $dS$ . Podle tohoto vztahu jednotkový tok prochází v homogenním poli plochou  $S = 1\text{m}^2$  kolmou ke směru  $B$ , je-li  $B = 1\text{T}$ . Je-li pole homogenní a vektor  $B$  kolmý k ploše  $S$ , dostaneme:

$$\Phi = B \cdot S \quad (\text{Wb; T, m}^2) \quad (4)$$

Magnetické pole má vždy vírový charakter, bez zřídla toku, takže tok vycházející z uzavřené plochy je vždy roven nule. Ze vztahu (2) je zřejmé, že jednotku magnetického toku 1 Wb lze také vyjádřit jako 1 Vs (voltsekunda). V soustavě CGSM byl jednotkou magnetického toku 1 M (Maxwell).  $1M = 10^{-8} \text{ Wb}$ . [3]

Etalon magnetického toku je analogický etalonu vzájemné indukčnosti. Je tvořen sekundární cívkou, jejíž plochou protéká magnetický tok známé hodnoty vyvolaný proudem primární cívkou. Obě cívky mají přesné a stabilní rozměry. Výstupní veličinou etalonu je impuls napětí indukovaný v sekundární cívkě při skokové změně proudu primární cívkou. [3]

### 2.1.3 Intenzita magnetického pole

Je to vektorová veličina definovaná z I. Maxwellovy rovnice, podle které je ve vzdálenosti  $r$  od přímého velmi dlouhého vodiče s proudem  $I$  intenzita magnetického pole [3]:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (\text{Am}^{-1}; \text{A}, \text{m}) \quad (5)$$

Jednotkou intenzity magnetického pole je  $1\text{Am}^{-1}$ , což je intenzita pole ve vzdálenosti  $r = I/(2\pi)$  m od vodiče s proudem  $I = 1\text{A}$ . Souvislost intenzity pole a indukce je dána vztahem:

$$H = \frac{B}{\mu \cdot \mu_0} \quad ; \quad B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H \quad (6)$$

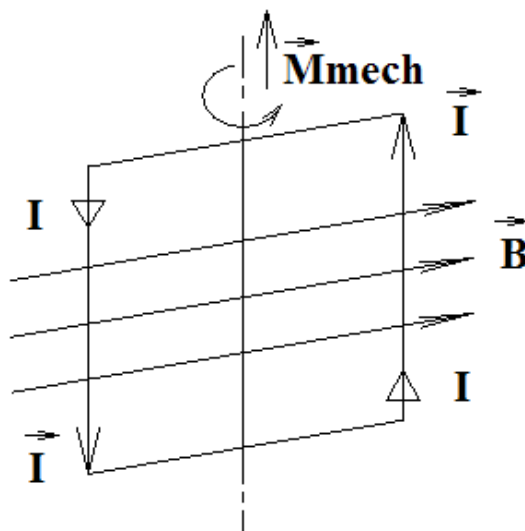
Kde  $\mu$  je poměrná (relativní) permeabilita prostředí. Je to bezrozměrné číslo, pro vakuum a prakticky i pro vzduch je  $\mu = 1$ .  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$  je magnetická konstanta neboli permeabilita vakua. Jednotkou intenzity magnetického pole v soustavě CGSM byl 1 Oe (Oersted).

$1\text{Oe} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-3}} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} = 79,6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  (ve vzduchu  $1\text{Gauss} = 1\text{Oersted}$ ). Etalony intenzity magnetického pole ve vzduchu jsou na základě vztahu (6) shodné s etalony magnetické indukce. [3]

### 2.1.4 Magnetický moment

Magnetický moment (Ampérův magnetický moment)  $m_m$  je dán mechanickým momentem působícím na závit s proudem, nebo na zmagnetované těleso v homogenním magnetickém poli s jednotkou indukci. Na závit s plochou  $S$  a proudem  $I$  (Obr. 2.3), umístěný v homogenním poli tak, že normála roviny závitu je kolmá ke směru vektoru  $B$ , působí mechanický moment [3]:

$$M_{\text{mech}} = S \cdot I \cdot B = m_m \cdot B \quad (7)$$



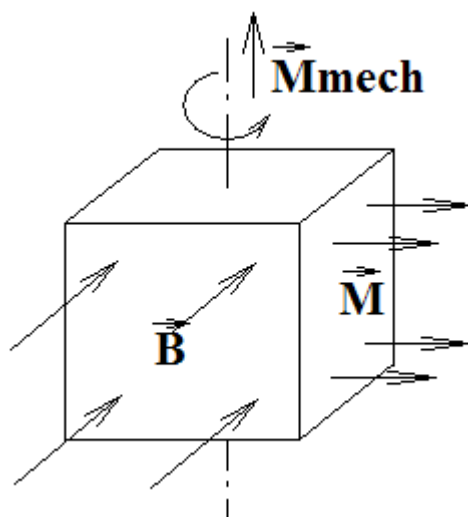
Obr. 2.3 Závít

Magnetický moment tohoto závitu je:

$$m_m = S \cdot I \quad (\text{Am}^2; \text{m}^2, \text{A}) \quad (8)$$

Na těleso homogenně zmagnetované s magnetizací  $M$  a s objemem  $V$ , umístěné v homogenním poli tak, že vektory  $M$  a  $B$  svírají pravý úhel (Obr. 2.4), působí mechanický moment:

$$M_{\text{mech}} = M \cdot V \cdot B = m_m \cdot B \quad ()$$



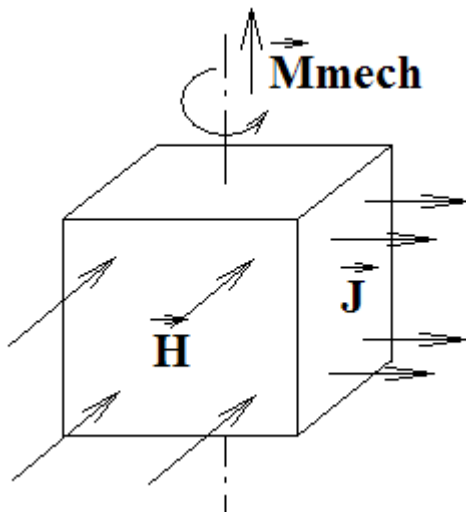
Obr. 2.4 Působení mechanického momentu na těleso

Magnetický moment tohoto tělesa je:

$$m_m = M \cdot V \quad (\text{Am}^2; \text{Am}^{-1}, \text{m}^3) \quad (9)$$

Na těleso s homogenní magnetickou polarizací  $J$  a s objemem  $V$ , umístěné v homogenním magnetickém poli s intenzitou  $H$  tak, že vektory  $J$  a  $H$  svírají pravý úhel (Obr. 2.5), působí mechanický moment [3]:

$$M_{mech} = J \cdot V \cdot H = m_d \cdot H \quad (10)$$



Obr. 2.5 Působení mechanického momentu na těleso

Magnetický dipólový moment (Coulombův magnetický moment) tohoto tělesa je:

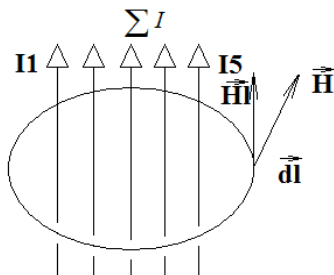
$$m_d = J \cdot V \quad (\text{Wbm; T, m}^3) \quad (11)$$

### 2.1.5 Magnetomotorická síla, magnetické napětí a potenciál

Magnetomotorická síla vyvolaná proudem a působící na uzavřené dráze je skalární veličina, definovaná podle I. Maxwellovy rovnice vztahem [3]:

$$F_m = \oint H dl = \oint H_l dl = \sum I \quad (\text{A; Am}^{-1}, \text{m, A}) \quad (12)$$

Kde  $H_l$  je podle Obr. 2.6 průmět vektoru  $H$  do směru elementu dráhy  $dl$ ,  $\sum I$  je celkový proud obepínaný uzavřenou drahou  $l$ , daný součtem proudů všech vodičů včetně uvažování jejich směrů [3].



Obr. 2.6 Definice celkového proudu

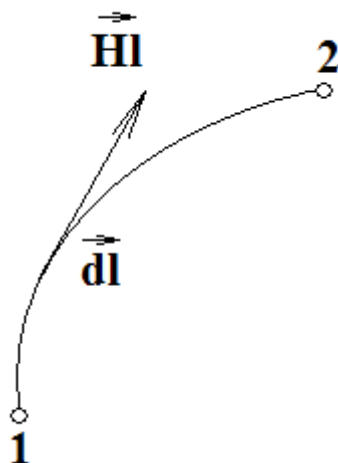
Přiřazení směru vektoru  $H$  k danému směru proudu je podle Obr. 2.6. Je-li po celé délce dráhy  $l$  všude stejně velká intenzita pole  $H$  a má-li vektor  $H$  všude směr elementu dráhy  $dl$ , platí jednoduchý vztah [3]:

$$F_m = H \cdot l = \sum I \quad (\text{A}; \text{Am}^{-1}, \text{m}, \text{A}) \quad (13)$$

Jednotková magnetomotorická síla působí na uzavřené dráze, která obepíná celkový proud 1A. Jednotkou magnetomotorické síly je 1A [3].

Magnetické napětí  $Um$  mezi body 1 a 2 měřené po dráze  $l$  (Obr. 2.7) je skalární veličina definovaná vztahem:

$$Um = \int_1^2 H_l dl \quad (\text{A}; \text{Am}^{-1}, \text{m}) \quad (14)$$



Obr. 2.7 Dráha magnetického napětí mezi body 1 a 2

V oblasti pole, kde neprochází elektrický proud, nezávisí hodnota integrálu na tvaru dráhy  $l$  a magnetické napětí můžeme vyjádřit rozdílem magnetických potenciálů bodů 1 a 2

$$Vm2 - Vm1 = \int_1^2 H_l dl \quad (\text{A}; \text{Am}^{-1}, \text{m})$$

Kde  $Vm1$  a  $Vm2$ , jsou skalární magnetické potenciály bodů 1 a 2. V homogenním poli je mezi body 1 a 2, jejichž spojnice má směr vektoru  $H$ , magnetické napětí a potenciál má jednotku 1A a je určen vztahem [3]:

$$Um = H \cdot l \quad (\text{A}; \text{Am}^{-1}, \text{m}) \quad (15)$$

## 2.2 Ampérův zákon

### 2.2.1 Ampérův zákon celkového proudu

Ampérův zákon celkového proudu popisuje vztah mezi magnetickou indukcí  $B$ , popřípadě intenzitou magnetického pole  $H$  a proudem  $I$ . Jedná se o zákon popisující magnetické pole v okolí vodiče, jimiž protéká elektrický proud  $I$  [7].

Zákon bývá nejčastěji popisován v následujícím tvaru:

$$\oint_C H \cdot dc = I \quad (16)$$

Kde  $C$  je uzavřená křivka, která je hranicí plochy, kterou prochází elektrický proud  $I$ .  $H$  označuje intenzitu magnetického pole a  $dc$  je element orientované křivky  $C$ .

Ampérův zákon v diferenciálním tvaru:

$$\text{rot} H = J \quad (17)$$

Kde  $J$  je objemová hustota elektrického proudu. Neprotékají-li plochou, jejíž hranicí je uzavřená křivka  $C$  žádné plošné proudy, je pravá strana tohoto vztahu rovna nule [7].

### 2.2.2 Ampérův zákon pro sílu v magnetickém poli

Ampérův zákon pro sílu v magnetickém poli formulovaný v diferenciálním vektorovém tvaru stanoví sílu  $dF$ , kterou působí magnetické pole o magnetické indukci  $B$  na element lineárního elektrického vodiče o délce a směru  $dl$  protékaného elektrickým proudem  $I$ . Vztah vyjadřuje následující rovnice [7]:

$$dF = Idl \times B \quad (18)$$

Pro homogenní magnetické pole a přímkový vodič lze vztah zjednodušit na tvar pro celkovou sílu:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (\text{N}) \quad (19)$$

Kde  $l$  je aktivní délka vodiče (část vodiče zasahující do magnetického pole) a úhel  $\alpha$  svírá směr vodiče se směrem magnetických indukčních čar.

Využití tohoto zákona slouží především k definici veličiny magnetická indukce. Magnetická indukce je vektorová veličina, jejíž vektorový součin s proudovým elementem se rovná síle, kterou magnetické pole působí na tento element [7].

### 2.2.3 Ampérův zákon pro sílu mezi dvěma vodiči

Tento vztah udává (magnetickou) sílu, kterou na sebe vzájemně působí dva elektrické vodiče protékané elektrickým proudem. Pro stacionární magnetické pole tak zákon představuje obdobu Coulombova elektrostatického zákona. Jako formální obdoba "statického" náboje v něm vystupuje "dynamický" elektrický proud. Zákon byl proto také dříve nazýván základním zákonem elektrodynamiky, než se staly základem elektrodynamiky Maxwellovy rovnice. Pomocí tohoto zákona byl také odvozen empiricky zjištěný Biotův-Savartův zákon [7].

Ampérův zákon pro sílu mezi dvěma vodiči formulovaný v diferenciálním vektorovém tvaru stanoví sílu  $d^2F$ , kterou magneticky působí element lineárního elektrického vodiče o délce a směru  $dl_0$  protékaný elektrickým proudem  $I_0$  na element lineárního elektrického vodiče o délce a směru  $dl$  protékaný elektrickým proudem  $I$ . Tento vztah lze pro působení ve vakuu zapsat rovnicí [7]:

$$d^2F = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_0 \cdot I \frac{dl \times [dl_0 \times (r - r_0)]}{|r - r_0|^3} \quad (20)$$

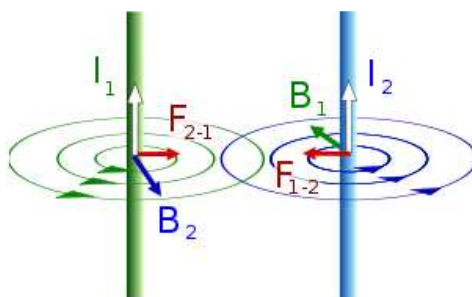
Kde  $r_0$ ,  $r$  jsou polohové vektory elementů  $dl$ ,  $dl_0$  a  $\mu_0$  je permeabilita vakua. Vztah lze zapsat v integrálním tvaru pro sílu, kterou působí uzavřená vodivá smyčka  $C_0$  protékaná elektrickým proudem  $I_0$  na uzavřenou vodivou smyčku  $C$  protékanou elektrickým proudem  $I$  [7].

$$F = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_0 \cdot I \oint_{C_0} \oint_C \frac{dl \times [dl_0 \times (r - r_0)]}{|r - r_0|^3} \quad (21)$$

Kde  $\oint$  jsou uzavřené křivkové integrály ve směru protékajícího proudu. Vztah se zjednoduší, budou-li vodiče přímkové a vzájemně rovnoběžné, vzdálené od sebe o kolmou vzdálenost  $d$ . Síla působící na jednotku délky vodičů pak bude dána vztahem [7]:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \quad (22)$$

Síla je přitom přitažlivá pro souhlasný a odpuzivá pro opačný směr proudu ve vodičích. Pro síly působící v lineárním homogenním magnetiku stačí v předchozích vztazích permeabilitu vakua nahradit permeabilitou daného prostředí [7].



Obr. 2.8 Silové působení dvou rovnoběžných přímých vodičů



## 2.3 Biotův-Savartův zákon

Vztah pro výpočet intenzity magnetického pole v okolí vodiče protékaného elektrickým proudem. Integrací lze z něho určit výsledné magnetické pole vytvořené libovolným vodičem. Využívá se především ve složitějších případech, tam kde nelze použít Ampérův zákon [7].

Biotův-Savartův zákon udává vztah mezi magnetickou indukcí  $B$ , proudem  $I$  a geometrickým uspořádáním vodiče v prostoru. Bodový náboj  $Q$ , který se v místě  $r_Q$  pohybuje rychlostí  $v$ , přispívá do místa s polohovým vektorem  $r$  magnetickou indukcí  $Br$ , což lze vyjádřit vztahem [7]:

$$B(r) = \frac{\mu \cdot Q \cdot v \times (r - r_Q)}{4\pi \|r - r_Q\|^3} \quad (23)$$

Pro hustotu elektrického proudu  $J$  dostáváme objemový integrál:

$$B(r) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{V_Q} J(r_Q) \times \frac{(r - r_Q)}{\|r - r_Q\|^3} dV \quad (24)$$

Tento vztah je analogický ke vztahu, který popisuje elektromagnetické pole jako funkci hustoty náboje. V diferenciálním tvaru můžeme psát:

$$dB(r) = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{dI \times r}{r^3} \quad (25)$$

Kde:  $dI = Idl$

Pro magnetickou indukci lineárního vodiče  $C$ , kterým protéká proud  $I$ , získáváme lineární integrál přes uzavřenou křivku:

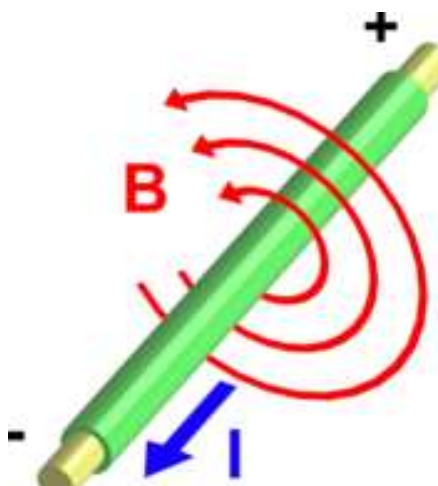
$$B(r) = \frac{\mu \cdot I}{4 \cdot \pi} \oint_C dr_Q \times \frac{(r - r_Q)}{\|r - r_Q\|^3} \quad (26)$$

kde  $dr_Q$  je nekonečně malý úsek vodiče ve směru proudu [7].

## 2.4 Magnetické pole v okolí přímého vodiče

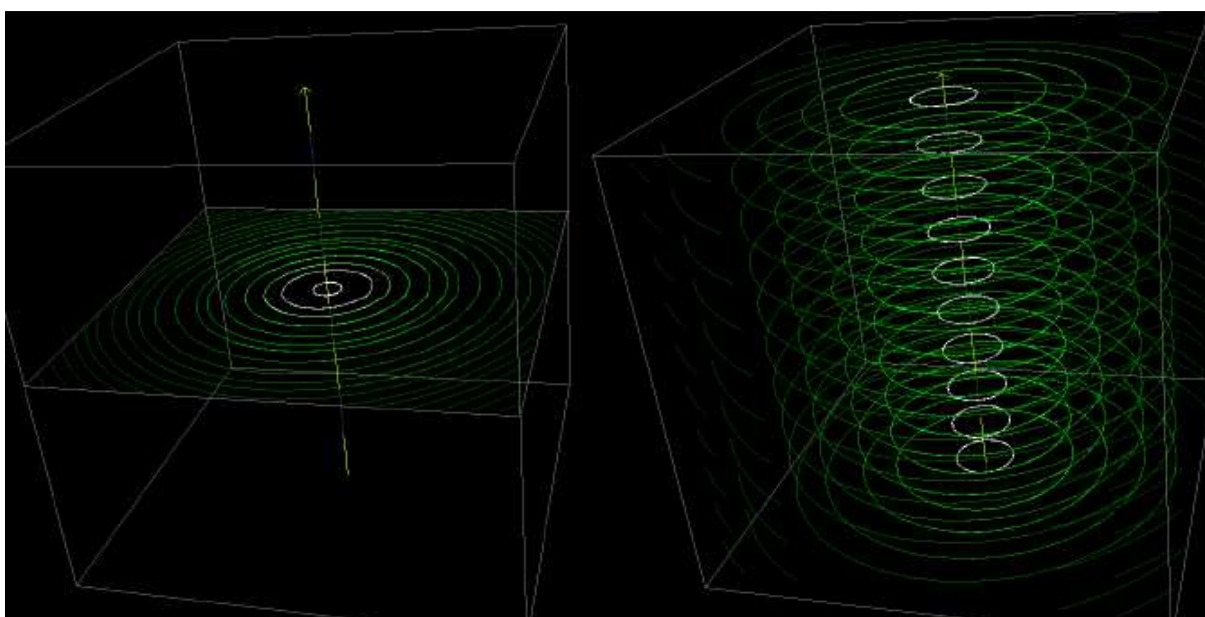
Protéká-li vodičem elektrický proud, vytváří se v jeho okolí magnetické pole. Je-li vodič rovný, mají magnetické siločáry tvar soustředných kružnic (Obr. 2.10) se středem na vodiči. Jejich směr určíme Ampérovým pravidlem pravé ruky (Obr. 2.9).

Pravidlo pravé ruky: pravou ruku přiložíme na vodič tak, aby vztyčený palec ukazoval směr proudu. Pak ohnuté prsty ukazují směr magnetických indukčních čar.



Obr. 2.9 Směr siločár dle pravidla pravé ruky

Následující obrázky ukazují tvar siločar při průchodu proudu vodičem.

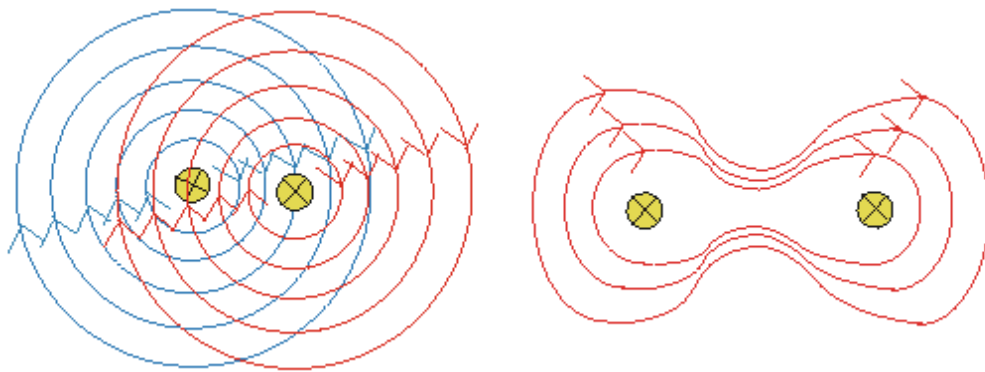


Obr. 2.10 Soustředěné siločáry v okolí vodiče

## 2.5 Magnetické pole v okolí více vodičů

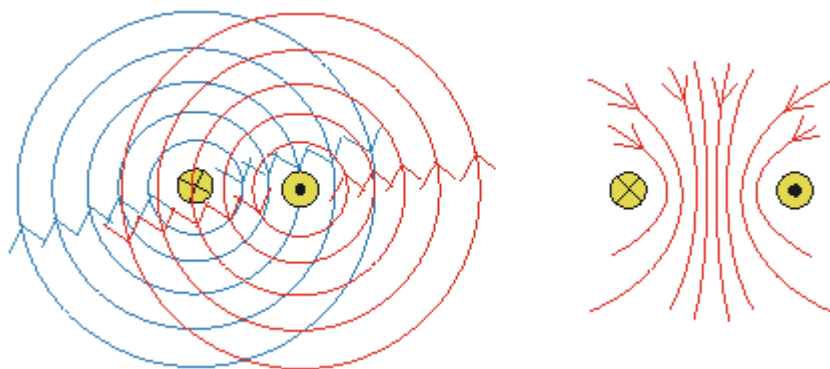
Máme-li dva dlouhé přímé vodiče vedle sebe, které jsou od sebe ve vzdálenosti  $d$ , a protékají jimi proudy  $I_1, I_2$  pak na sebe působí silou prostřednictvím svých magnetických polí.

Jestliže proud prochází stejným směrem u obou vodičů, pak v oblasti mezi vodiči jsou siločáry obou magnetických polí orientovány proti sobě. To znamená, že se magnetické pole zeslabuje. V oblasti vně vodičů mají siločáry obou polí stejný směr, díky němuž se pole zesiluje a vodiče jsou přitahovány k sobě (Obr. 2.11).



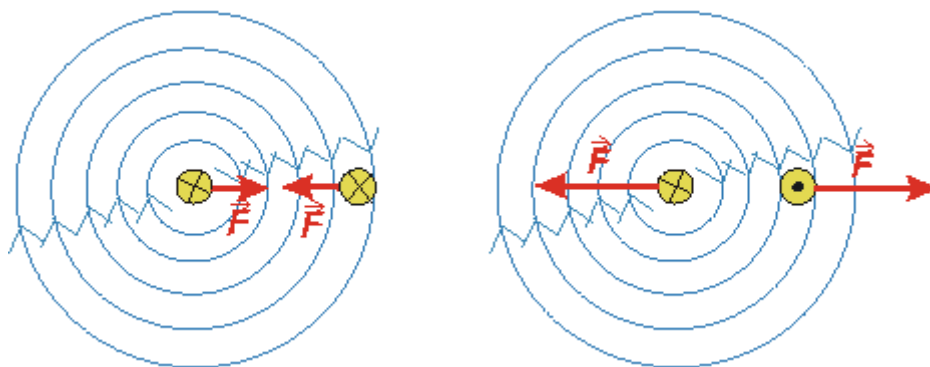
Obr. 2.11 Výsledné magnetické pole pro stejné směry proudů

Jestliže proud prochází opačným směrem, tak v oblasti mezi vodiči mají siločáry obou polí stejný směr. To znamená, že se magnetické pole zesiluje. V oblasti vně vodičů mají siločáry obou magnetických polí různý směr, díky němuž se pole zeslabuje a vodiče jsou taženy od sebe (Obr. 2.12).



Obr. 2.12 Výsledné magnetické pole pro opačné směry proudů

Je-li síla působící na vodič v magnetickém poli pak jeden vodič (Obr. 2.13) vytváří magnetické pole a druhý vodič je vodič nacházející se v tomto magnetickém poli. Směr síly působící na tento vodič určíme pomocí Flemingova pravidla levé ruky.



Obr. 2.13 Síly působící na vodič

Prochází-li proud stejným směrem, vodiče se přitahují, prochází-li opačným směrem, tak se vodiče odpuzují.

Velikost indukce magnetického pole, kterou vytváří vodič 1 v místě 2, je:

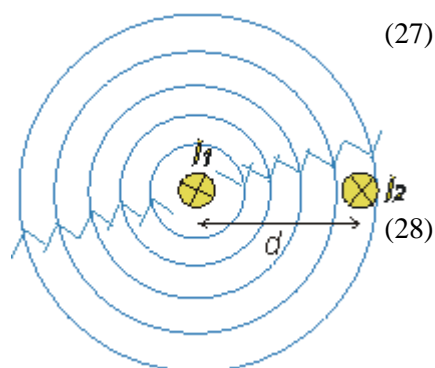
$$B = \frac{\mu \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad (\text{T}) \quad (27)$$

Na vodič 2 působí v tomto místě síla:

$$F = B \cdot I_2 \cdot l \quad (\text{N})$$

Po dosazení za velikost magnetické indukce je:

$$F = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{d} \quad (\text{N}) \quad (29)$$



To je síla, kterou se vodiče přitahují nebo odpuzují. Pomocí tohoto vztahu pro sílu se definuje jedna ze sedmi základních jednotek SI, což je jednotka elektrického proudu jeden ampér.

Definice jednotky proudu ampér (A):

Ampér je stálý proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného průřezu umístěnými ve vakuu ve vzdálenosti 1 m od sebe vyvolá mezi vodiči sílu o velikosti  $2 \cdot 10^{-7}$  N na 1 m délky vodiče.

### 3 Měření magnetických vlastností vybrané kolejnice

Kolejnice spolu s pražci, upevňovacími a drobným kolejivem patří mezi základní části železničního svršku. Jsou nejvíce namáhanou součástí svršku, neboť přicházejí do přímého styku s koly vozidel. Mezi její hlavní funkce patří především zajištění hladkého pohybu železničního vozidla a zároveň plní funkci vodiče vedení u elektrifikovaných drah.

Kolejnice se dělí na různé typy podle jejich funkce a vlastností, což ovlivňuje jejich rozměry, tvar a chemické složení. Typy kolejnic využívaných u nás ČD jsou vyrobeny převážně v Třineckých železárnách, které nabízejí ve svém výrobním programu celou škálu různých typů o různém chemickém složení. Dané chemické složení má velký vliv na vytvořené magnetické pole kolejnice. Používají se širokopatní kolejnice válcované z kolejnicové oceli jakosti UIC 900A. Tato ocel má pevnost v tahu 880 až 1030 MPa a tažnost A5 10%. Obsah uhlíku je od 0,6 do 0,8 %, u kolejnic S 49 až 1,4% obsahu uhlíku. Některé kolejnice bývají obohacovány dalšími prvky, popřípadě legovány manganem a křemíkem. Toto se převážně používá u více zatížených tratí pro jejich větší životnost.

Cílem měření magnetických vlastností kolejnice je určit jaké skutečné magnetické vlastnosti daný materiál má. Za účelem tohoto měření byl zhotoven vzorek o požadovaném chemickém složení viz. Tab. 3.1. Vzorky mají tvar prutu o rozměrech 0,5x0,5x50 cm a jsou orientovány v podélném směru s kolejnicí. Pro měření je zapotřebí 4 kusů vzorků aby se dal vytvořit magnetický obvod. Měření DC charakteristik bylo provedeno pomocí kvalitního systému Remagraph. Měření s tímto systémem je založeno na metodě toroidu. Vyhodnocení výsledků je provedeno pomocí fluxmetrů, které zaznamenávají všechny velmi malé přírůstky indukovaného napětí, vznikajícího při změně budícího proudu.

Tab. 3.1 Chemické složení vzorku kolejnice UIC 60:

Kolejnice	Ocel	Chemické složení								
		C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
UIC60	UIC 900A	0,714	0,93	0,33	0,019	0,017	0,05	0,05	0,02	0,001

#### 3.1 Systém Remagraph C-500

Jedná se o měřicí systém určený ke zjišťování stacionárních BH a magnetovacích charakteristik feromagneticky měkkých konstrukčních materiálů (oceli, plechy, ferity, aj.).

Princip měření magnetických vlastností materiálů s tímto systémem je založen na obecné metodě měření na toroidu. Magnetické vlastnosti lze pomocí tohoto měřicího systému určovat na uzavřených vzorcích s konstantním průřezem a definovatelnou střední siločarou. Vzorky mohou být vyrobeny z plného materiálu nebo vinuté (složené) z plechů [8].

Měřicí systém umožňuje měřit:

- 1) BH charakteristiky (celé křivky)
- 2) BH charakteristiky – magnetovací (první kvadrant)
- 3) Demagnetizace

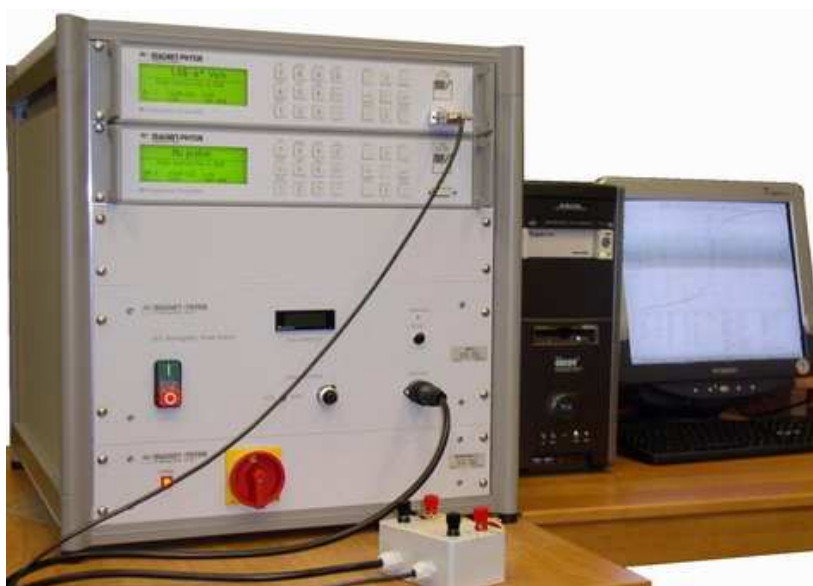
Měřicí systém Remagraph, je uzpůsoben pro měření stacionárních BH charakteristik a magnetovacích charakteristik magneticky měkkých materiálů. Pojmem stacionární je zde myšleno budící

magnetické pole, jehož časová změna je tak malá, že se při ní neprojeví vliv vířivých proudů v měřeném vzorku. Pomocí tohoto měřicího systému lze měřit magnetické vlastnosti na toroidních vzorcích nebo jiných uzavřených vzorcích [8].

Základní princip měření vychází z metody měření na toroidu. Zpracovávání a vyhodnocování signálu indukovaného napětí v sekundárním vinutí, pomocí kterého je určována magnetická indukce ve vzorku, již nelze provádět osciloskopickou metodou. Důvodem je, že časová změna intenzity magnetického pole buzeného (kvazi) stacionárním proudem je velmi malá, takže v měřeném vzorku vyvolává rovněž velmi malou změnu magnetické indukce úměrnou magnetickým vlastnostem materiálu vzorku. Sekundární vinutí obklopující vzorek a v něm vytvořený rovněž velmi pomalu se měnící magnetický tok pak indukuje jen velmi malé a pozvolné napěťové impulsy. Z uvedeného důvodu je pro měření a vyhodnocování indukovaného napětí nutno použít integrační měřicí přístroj, v tomto případě elektronický luxmetr [8].

Základní části tohoto měřicího systému tvoří:

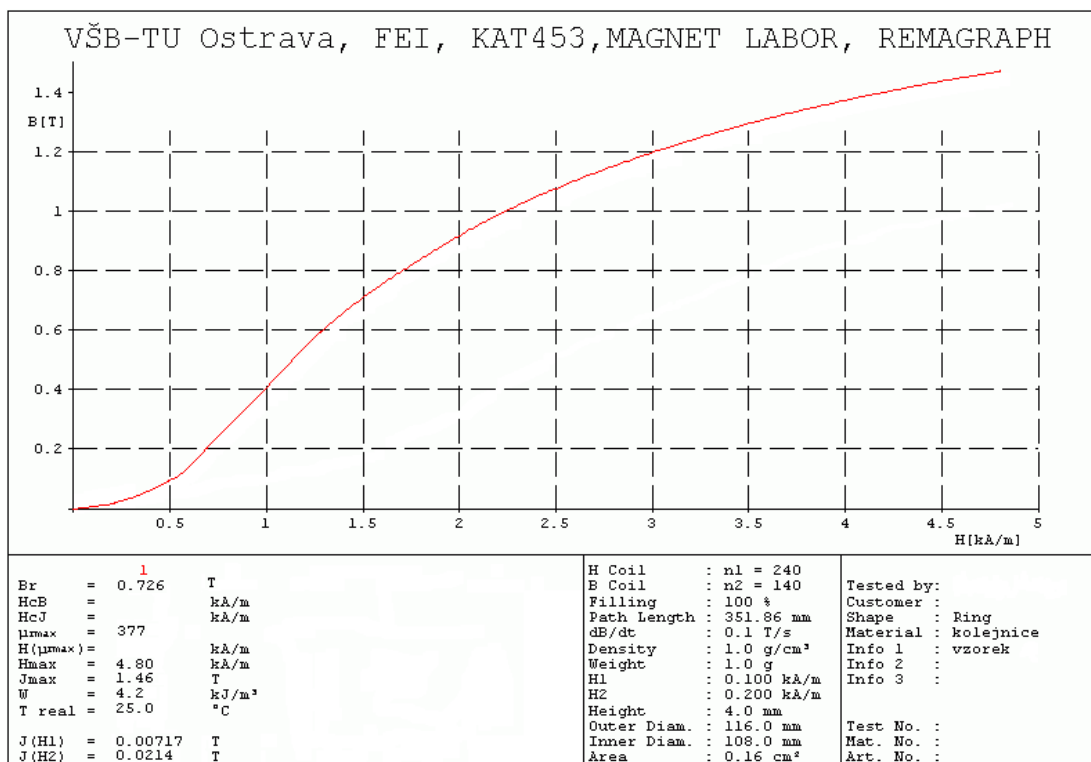
- 1) Výkonový napájecí zdroj stejnosměrného proudu
- 2) Elektronický fluxmetr -1 (záznam signálu H)
- 3) Elektronický fluxmetr -2 (záznam signálu J,B)
- 4) Řídící jednotka (synchronizace nastavení proudu a snímání veličin)
- 5) multifunkční komunikační karta
- 6) Software REMA pro řízení, vyhodnocení a zpracování měření a měřených dat (společně s PC)



Obr. 3.1 Systém Remagraph

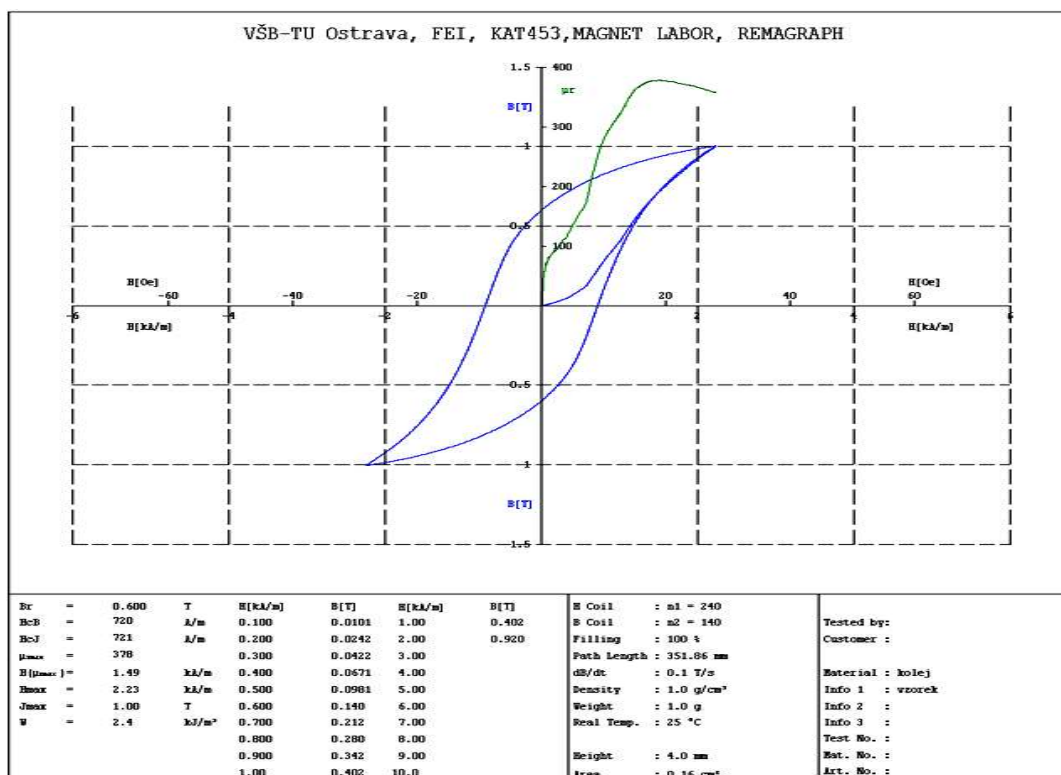
## 3.2 Stacionární magnetovací charakteristika

Na následujícím obrázku (Obr. 3.2) je vykreslena stacionární magnetovací charakteristika daného materiálu kolejnice. Jedná se o DC stacionární charakteristiku, která byla pořízena (naměřena) v laboratoři magnetických měření pomocí systému Remagraph.

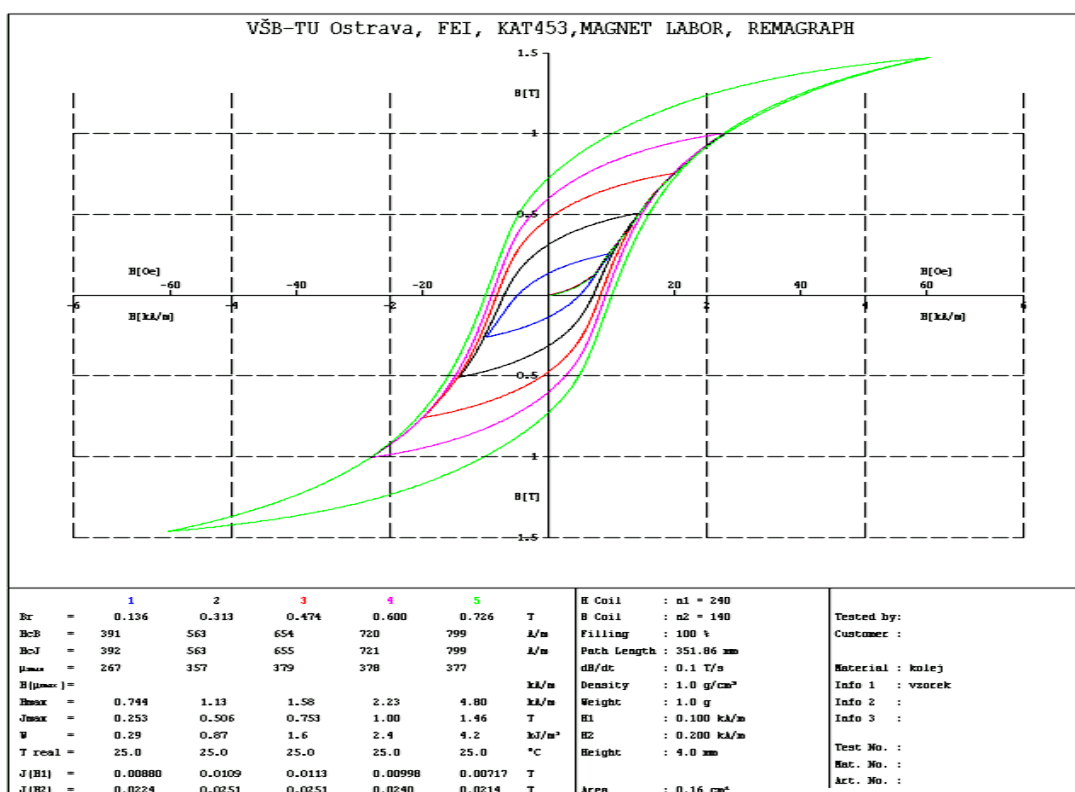


Obr. 3.2 DC magnetovací charakteristika

### 3.3 BH charakteristiky



Obr. 3.3 BH charakteristika pro B=1



Obr. 3.4 BH charakteristika pro B=0,25 0,5 0,75 1 a 1,5 T

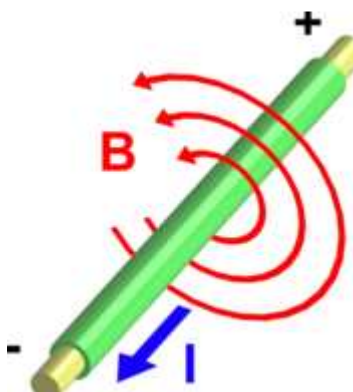


## 4 Měření magnetických polí v blízkém okolí kolejnice

### 4.1 Analýza magnetického pole pomocí měření

Úkolem tohoto měření bylo zjistit velikost magnetického pole v okolí kolejnice při průchodu stejnosměrného proudu o hodnotách 100A, 200A, 300A, 400A, 500A a 550A. Měření bylo provedeno v laboratorních podmínkách v prostorách VŠB – TU Ostrava na části kolejnice typu UIC 60 (60 E1) o délce 1,5m. Základním důvodem pro měření v laboratoři je konstantní průchod proudu kolejnicí a tím stálé magnetické pole v okolí kolejnice, čehož se při měření v terénu těžko dosahuje. Mezi další důvody pro volbu měření v laboratoři byla jednoznačně bezpečnost měření.

Kolejnici můžeme přirovnat k osamocenému vodiči a tudíž použít teorii magnetického pole v okolí osamoceného a nekonečně dlouhého vodiče. Již v roce 1820 zjistil dánský fyzik H.Ch. Oersted (1777-1851) pomocí magnetky, že v okolí vodiče s proudem je magnetické pole. Tím byla prokázána souvislost magnetického pole s polem elektrickým. Magnetické pole v okolí vodiče je charakterizováno magnetickými indukčními čarami. Magnetické indukční čáry jsou ve všech případech uzavřené křivky a nikde se neprotínají, viz následující obrázek:



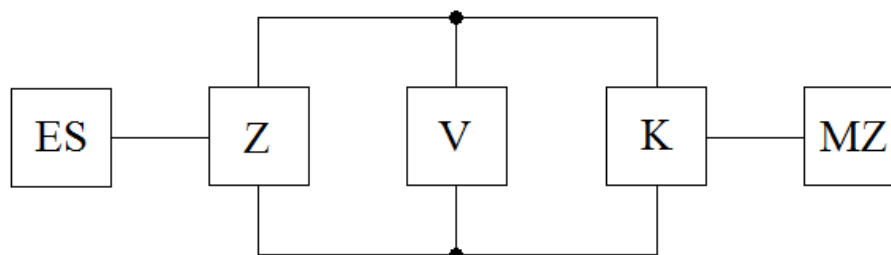
Obr. 4.1 Indukční čáry v blízkosti vodiče

Z této teorie můžeme konstatovat, že podobné magnetické čáry jsou i v okolí kolejnice, pouze s tím rozdílem, že jsou mírně zdeformované díky danému profilu kolejnice.

Pro sběr dat byl použit přístroj Gauss/Tesla metr série 5100 model 5180 s měřicí sondou typu STD18 – 0404. Dalším velmi důležitým prvkem pro provedení měření je konstrukce pro uchycení sondy. Díky této konstrukci můžeme pohybovat se sondou v ose x a y v rozsahu 50x50 cm a díky tomu proměřit poměrně velkou část magnetického pole v okolí kolejnice. Měření bylo prováděno po 1 cm a díky tomu bylo naměřeno pro každý z proudů 2500 hodnot, což plně dostačuje k následnému vyobrazení skutečného magnetického pole pomocí programu LabView. Nutno ještě podotknout, že konstrukce byla provedena z nevodivých materiálů a díky tomu nemá žádný vliv na naměřené hodnoty, což vede k jednoznačnému zmenšení chyby měření.

#### 4.1.1 Blokové schéma měření a postup měření

Blokové schéma:



Obr. 4.2 Blokové schéma měření

ES – elektrická síť, která zaručuje napájení zdroje 400V, 50Hz, 3 fáze

Z – zdroj stejnosměrného proudu 30 – 550A (tyristorová svářečka)

V – voltmetr, plní pouze informativní funkci

K – vzorek kolejnice UIC 60 (60 E1) o délce 1,5m

MZ – měřicí zařízení (Tesla metr plus mechanická konstrukce pro uchycení měřicí sondy a možnosti nastavení pracovního bodu)



Obr. 4.3 Měřicí pracoviště

Postup měření:

Základem měření je zdroj stejnosměrného proudu napájený ze sítě 400V/50Hz. Jedná se o tyristorovou svářečku, která je schopna udržovat konstantní svařovací proud. Zdroj nám dovoluje tento proud nastavit od hodnoty 30A do 550A při minimálním napětí. Bylo zapotřebí proměřit celý rozsah zdroje, proto jsem při měření postupně volil proudy 100A, 200A, 300A, 400A, 500A a maximální hodnotu 550A.

Proud vycházející ze zdroje je přímo přiveden na vzorek kolejnice a tím je zajištěn vznik magnetického pole v okolí kolejnice, který je přímo úměrný protékajícímu proudu kolejnicí. To znamená, že čím vyšší proud, tím vyšší magnetické pole v okolí kolejnice. Toto vzniklé magnetické pole bylo zaznamenáváno pomocí jednoho z nejlepších a nejmodernějších ručních přístrojů magnetické indukce, který využívá digitální zpracování signálu DSP. Přístroj podporuje připojení celé škály snímacích sond, pro měření jsem zvolil sondu typu STD18-0404, která byla nejvhodnější, co se týče citlivosti a rozmezím snímaných hodnot. Sonda se upevňuje do předem nachystaného přípravku (Obr. 4.4), který je součástí polohovatelného zařízení. Toto polohovatelné zařízení slouží k proměření magnetického pole v rozmezí přibližně 50x50 cm. Abych následně mohl dané pole převést do grafické podoby je zapotřebí nasbírat dostatečný počet hodnot. Proto jsem volil krok 1 cm s přesností  $\pm 0,5$  mm jak ve vertikálním směru, tak i ve směru horizontálním. Díky tomu jsem získal pro každý z nastavovaných proudů 2500 hodnot.



Obr. 4.4 Přípravek k uchycení měřící sondy

Při práci se zdrojem takto velkých proudů je zapotřebí dbát zvýšené opatrnosti především v místech připojení kabelů ke zdroji a kolejnici. Jelikož při neopatrné manipulaci by mohlo dojít k rozpojení kontaktu kabel-kabel nebo kabel-kolejnice a tím by mohlo dojít k vytážení oblouku a případnému úrazu elektrickým proudem. Původně byl kabel připojen ke kolejnici pomocí kleští, jak je patrné z předchozího obrázku (Obr. 4.3). Z důvodu bezpečnosti a z důvodu vznikajících přechodových jevů, následnému velkému oteplování těchto spojů a vznikajících problémů, které se při měření vyskytly, bylo zapotřebí tento problém vyřešit. Tento problém jsem vyřešil pomocí pevného spojení, což dokumentuje následující obrázek (Obr. 4.5).



Obr. 4.5 Ukázka uchycení kabelu ke kolejnici

#### 4.1.2 Kolejnice UIC 60 (60 E1)

Kolejnice spolu s pražci, upevňovacími a drobným kolejivem patří mezi základní části železničního svršku. Jsou nejvíce namáhanou součástí svršku, neboť přicházejí do přímého styku s koly vozidel. Kolejnice slouží k přenášení tzv. kolové síly při rozjezdu, k absorpci tzv. podélné neboli brzdné síly a k přenosu síly příčné (vodící) při průjezdu drážního vozidla obloukem (zatáčka o určitém R). Mezi její hlavní funkce patří především zajištění hladkého pohybu železničního vozidla a zároveň plní funkci vodiče vedení u elektrifikovaných drah.

Kolejnice se dělí na různé typy podle jejich funkce a vlastností, což ovlivňuje jejich rozměry, tvar a chemické složení. Mezi základní typy u nás používaných kolejí patří:

- 1) širokopatní - pro železniční svršek
- 2) žlábková - pro tramvajové tratě
- 3) bloková - pro tramvajové tratě, vetknuté ve speciálních panelech
- 4) jeřábová

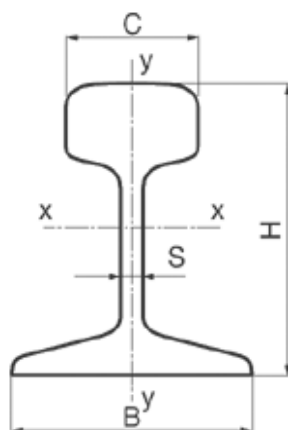
Typy kolejnic využívaných u nás ČD jsou vyrobeny převážně v Třineckých železárnách, které nabízejí ve svém výrobním programu celou škálu různých typů o různém chemickém složení. Dané chemické složení má velký vliv na vytvořené magnetické pole kolejnice. Používají se širokopatní kolejnice válcované z kolejnicové oceli jakosti UIC 900A. Tato ocel má pevnost v tahu 880 až 1030 MPa a tažnost A5 10%. Obsah uhlíku je od 0,6 do 0,8 %, u kolejnic S 49 až 1,4% obsahu uhlíku. Některé kolejnice bývají obohacovány dalšími prvky, popřípadě legovány manganem a křemíkem. Toto se převážně používá u více zatížených tratí pro jejich větší životnost. Dalším důležitým faktorem je tvar průřezu dané kolejnice. V současnosti jsou v hlavních a traťových kolejích používány nové kolejnice tvaru UIC 60 s hmotností 60 kg na metr délky, v ostatních staničních kolejích pak kolejnice tvaru S 49 s hmotností cca 50 kg na metr délky, případně se využívá i tvar R 65, vyzískaný z rekonstruovaných hlavních kolejí, a v méně důležitých kolejích se ponechávají i starší tvary T a A.



U nás se nejčastěji vyskytují kolejnice těchto typů:

- 1) S 49 - regionální tratě: výška 149 mm; šířka paty 125 mm; šířka hlavy 70 mm; tloušťka stojiny 14 mm
- 2) R 65 - celostátní tratě: výška 180 mm; šířka paty 150 mm; šířka hlavy 72,8 mm; tloušťka stojiny 18 mm
- 3) UIC 60 - na koridorech nahrazuje R 65 : výška 172 mm; šířka paty 150 mm; šířka hlavy 72 mm; tloušťka stojiny 16,5 mm
- 4) T - regionální tratě, dnes velmi málo: výška 150 mm; šířka paty 128 mm; šířka hlavy 65,5 mm; tloušťka stojiny 15 mm

Pro mé laboratorní měření byla zvolena širokopatná kolejnice typu UIC 60 dnes 60 E1 o délce 1,5m a následujících parametrech:



Rozměr (kóta) mm	UIC 60 (60 E1)
H – výška kolejnice	172
B – šířka paty	150
C – šířka hlavy	74,3
S – tloušťka stojiny	16,5
G – hmotnost (kg/m)	60,21
A – průřez. plocha (cm <sup>2</sup> )	76,7
Moment setrvačnosti J <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	3038,3
Modul průřezu W <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )	333,6

Obr. 4.6 Průřez kolejnice a tabulka s hodnotami

Tab. 4.1 Materiálové vlastnosti kolejnice UIC 60 (60 E1) [9]:

Značka oceli	Norma	Chemické složení					R <sub>m</sub> MPa	A5 % min
		C	Mn	Si	P max	S max		
900A	UIC860-V	0,60 – 0,80	0,80 – 1,30	0,10 – 0,50	0,040	0,040	880-1030	10

### 4.1.3 Zdroj

K laboratornímu měření byl použit zdroj Jackle G550 S od německé firmy Jackel. Jedná se o firmu s dlouholetou tradicí, která působí na trhu od roku 1978 a dnes patří mezi přední evropské výrobce svařovací techniky a techniky svařování a řezání plazmou.

Zdroj Jackle G550 S je plynule regulovatelná tyristorová svářečka, která zajišťuje plynule regulovatelný svařovací proud.

Při práci s tímto zdrojem je zapotřebí si uvědomit, že zdroj není schopen pracovat nepřetržitě a to především u vyšších proudů. Se zvyšujícím se proudem se krátí pracovní cyklus zdroje viz. Tab. 4.2 V praxi to znamená, že při nižších proudech můžeme zdroj zatěžovat nepřetržitě, zatím co při vyšších proudech je zapotřebí v určitých časových intervalech zdroj odpojovat, aby nedošlo ke zbytečnému přehřívání či dokonce poškození zdroje.

Vlastnosti zdroje:

- 1) regulovatelný proud od 30 do 550A
- 2) funkce HOT Start a vypnutí zapalování pro zlepšení vlastností elektrod
- 3) neustále zobrazení svařovacího proudu pomocí display umístěného na čele zdroje
- 4) tepelná ochrana proti přetížení
- 5) masivní ocelová konstrukce
- 6) spínače a ovládací prvky jsou chráněny proti prachu
- 7) transformátor dodatečně izolován speciální pryskyřicí
- 8) nízký hluk ventilátoru
- 9) zásuvka pro připojení dálkového ovládání

Tab. 4.2 Parametry zdroje:

Napětí, 50 / 60 Hz	400 V, 3 fáze
Pojistka	63 A pomalá
Max výkon	46 kVA
Rozsah nastavení	30 - 550 nepřetržitě
Pracovní napětí	21 až 42 V
Load napětí	80 V
Pracovní cyklus 25 (40) ° C	40(30)%
	550 / 42 V
	60(40)% ----
	80(60)% ----
	100(85)% 350 / 34 V
Krytí	IP 22
Izolační třída	H (180 ° C)
Chlazení	F
Váha	210 kg
Rozměry dx š xv (mm)	810 x 500 x 850



Obr. 4.7 Svářečka

#### 4.1.4 Zařízení pro měření magnetického pole

Pro měření magnetického pole v okolí kolejnice byl použit měřicí přístroj Gauss/Tesla metr série 5100 model 5180. Tento měřič magnetické indukce série 5100 pracuje na principu Hallova jevu a je nejnovějším modelem v oblasti magnetických měření. Tento model využívá digitální zpracování signálu (DSP). Jeho unikátní systém DPC (Dymamic Probe Connection) umožňuje měření od 0 do 30 kG s přesností 1%. Mezi základní vlastnosti tohoto přístroje patří automatické nulování, ukládání maximální, minimální a špičkové hodnoty, automatické přepínání rozsahů a rozdílové měření. Model umožňuje přepínání jednotek mezi Gauss a Tesla. Model 5180 má navíc možnost odečítat výsledek měření v A/m a je navíc vybaven analogovým výstupem ( $\pm 3V$ ) a portem USB [5].

Díky vnitřnímu programovému vybavení tohoto ručního měřiče magnetické indukce odpadá nutnost pravidelné kalibrace přístroje. Díky přehlednému LCD displeji má přístroj velmi jednoduché a rychlé ovládání. Tento přístroj je vhodný jak k laboratornímu měření, tak i k měření v náročných průmyslových podmínkách [5].

Charakteristika přístroje:

- 1) vysoká přesnost a spolehlivost
- 2) možnost ukládání výsledků
- 3) vysoké rozlišení a rychlá frekvenční odezva
- 4) digitální zpracování signálu DSP
- 5) automatické nulování
- 6) ukládání max. a min. špičkové hodnoty
- 7) automatické přepínání rozsahů
- 8) rozdílové měření
- 9) USB rozhraní

Tab. 4.3 Katalogové parametry měřicího přístroje:

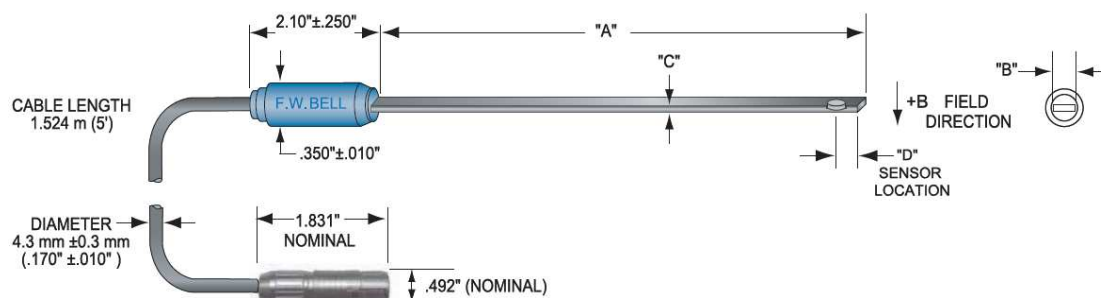
Základní přesnost	1 %
Frekvenční rozsah	0 - 40 kHz
Vzorkovací frekvence	5 vzorků / s
Rozsah Ultra dolní	1G (0,1mT)
Rozsah dolní	300G (30mT)
Rozsah střední	3kG (300mT)
Rozsah horní	30kG (3T)
Rozlišení Ultra dolní	1mG (0,1μT)
Rozlišení dolní	0,1G (10μT)
Rozlišení střední	1G (100μT)
Rozlišení horní	10G (1mT)
Displej	LCD
Rozsah zobrazení	3,5 místa
Jednotky	Gauss / Tesla / A/m
Analogový výstup	±3V
Komunikační rozhraní	USB
Teplotní rozsah pracovní	0°C - 50°C
Teplotní rozsah skladovací	-25°C – 70°C
Napájení	4 baterie typu AA
Rozměry	6,9" x 3,9" x 1,44"



Obr. 4.8 Gauss/Tesla metr

Tab. 4.4 Rozměry použité sondy STD18 - 0404:

A	B	C	D
4"	0,150"	0,040"	0,0335"



Obr. 4.9 Haloova sonda

Tab. 4.5 Katalogové hodnoty použité sondy STD18 - 0404:

Materiál	Linearita	Citli-vost	Aktivní plocha	Pracovní teplota	Teplotní stabilita		frekvence
					Nula	kalibrační	
G10– tuhé epoxidové sklo	0,5%/30kG	1x	0,015"	0°C - 75°C	±0,300 G/°C	-0,05% %/°C	DC do 20kHz

#### Hallův jev a Haloova sonda

Hallovo napětí  $U_H$  (V) o velikosti:

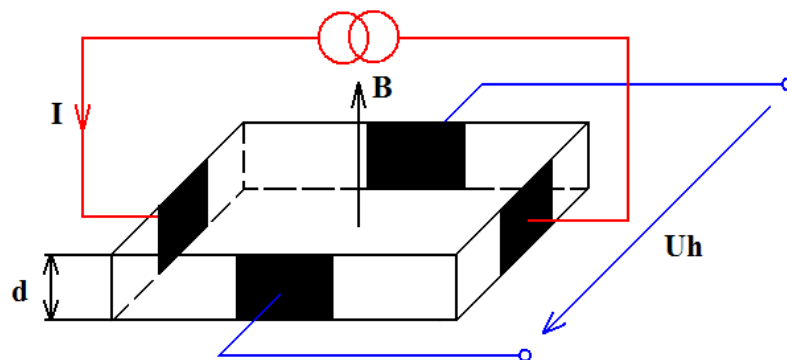
$$U_H = R \cdot \frac{I}{d} \cdot B \quad (\text{V}) \quad (30)$$

kde:  $d$  - tloušťka vzorku (m)  
 $R$  - Haloova konstanta ( $\Omega\text{m/T}$ )  
 $I$  - pomocný proud (A)  
 $B$  - indukce měřeného pole (T)

se objeví na kontaktech ve směru kolmém k proudu  $I$  působícímu poli (Obr. 4.10). Příčinou tohoto jevu je deformace proudových čar vlivem Lorenzovy síly a následný vznik elektrického pole. Haloova konstanta je nepřímo úměrná hustotě nosičů proudu, je tedy u polovodičů značně vyšší než u vodičů. Při stejné velikosti proudu se totiž musí nosiče proudu pohybovat rychleji u materiálu s nižší hustotou nosičů, Lorenzova síla je pak větší. Křemíkové senzory jsou použitelné pro měření polí v rozsahu přibližně od 1mT do 1T. Pro měření polí slabších do 100nT se hodí čidla z antimonidu india. Velikost aktivní plochy sahá od 0,5 x 1 mm u bodových čidel až po několik mm<sup>2</sup> u sond pro měření slabých polí [3].

Hallovy sondy mohou pracovat v širokém rozsahu teplot (omezením je většinou odolnost pouzdra a přívodů). Frekvenční limit bývá většinou 1 MHz. Hlavní nevýhodou je teplotní závislost citlivosti (tu lze částečně kompenzovat), offset a jeho teplotní drift a šum. Výhodou je, že sondy neobsahují feromagnetikum, lze s nimi měřit i v těsné blízkosti feromagnetik. K světovým výrobcům patří firma Bell [3].





Obr. 4.10 Schéma Hallova článku

## 4.2 Analýza magnetického pole pomocí výpočtu

Analytické metody výpočtu polí jsou omezeny na 1D a 2D úlohy s jednoduchými okrajovými podmínkami. Praktické úlohy byly do nedávné doby řešeny na různých modelech zpravidla proudových polí, které jsou podřízeny stejným rovnicím. S rozvojem výpočetní techniky jsou v posledních dvaceti letech vyvíjeny účinné numerické metody, které umožňují modelovat reálná 2D i 3D pole. Reálná magnetická pole se počítají stejně jako pole elektrická pomocí numerických metod. Podobnost diferenciálních rovnic s rovnicemi elektrostatiky umožňuje použít tytéž metody. Prakticky se používají pro modelování: metoda konečných diferencí, metoda konečných prvků a metoda hraničních prvků, které lze modifikovat i pro výpočet nelineárních polí [2].

Společným rysem numerických metod je náhrada přesného řešení diferenciální nebo integrální rovnice řešením přibližným, které vyjádří hledanou funkci v konečném počtu vybraných bodů (uzlů). Pole mimo uzly nalezneme vhodnou aproximací. Každá úloha je zadána [2]:

- 1) Popisem geometrie a materiálových vlastností podoblastí  $\Omega_i$ , ze kterých sestává oblast  $\Omega$ , ve které hledáme pole.
- 2) Popisem okrajových podmínek na hranicích podoblastí  $\Psi_i$  a oblasti  $\Psi$ .
- 3) Diferenciální nebo integrální rovnicí pole.
- 4) Dalšími vztahy, kterými s vypočtených veličin stanovíme veličiny hledané (intenzitu, kapacitu, síly aj.).

Prakticky se používá metoda konečných prvků a konečných diferencí, které lze modifikovat i pro výpočet nelineárních polí. Metoda hraničních prvků vyžaduje krom plošných integrálů počítat v nelineárních prostředích i integrály objemové, čímž ztrácí svoji hlavní výhodu redukce dimenze úlohy o jeden [2].

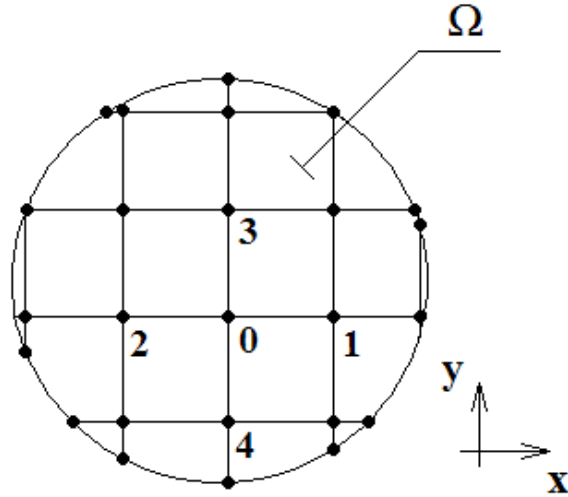
### 4.2.1 Metoda konečných diferencí

Metoda konečných diferencí nebo též metoda sítí je založena na nahrazení parciálních derivací diferenčními aproximacemi potenciálu z uzlových hodnot sítě. Obecný postup řešení sestává z těchto kroků [2]:

- 1) Oblast  $\Omega$  pokryjeme sítí. Pro 2D úlohu volíme síť čtvercovou, obdélníkovou polární, pro 3D úlohu její prostorový ekvivalent. Hledanou veličinou je potenciál v průsečících sítě.

Průsečíky se nazývají uzly, příslušné potenciály uzlovými. Příklad čtvercové uzlové sítě pro 2D problém je na Obr. 4.11

- 2) V každém uzlu nahradíme parciální derivace v Poissonově rovnici numerickými derivacemi z uzlových hodnot potenciálu. Namísto parciální rovnice tak dostaneme rovnici algebraickou pro uzlové potenciály.
- 3) Postup opakujeme pro všechny uzly s neznámými potenciály, čímž obdržíme soustavu algebraických rovnic pro uzlové potenciály.
- 4) Soustavu vyřešíme vhodnou numerickou metodou.



Obr. 4.11 čtvercová uzlová síť

Dvourozměrné rovinné pole popisující funkce  $\varphi_m(x, y)$  a  $A_z(x, y)$ , které vyhovují rovnicím:

$$\frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial y^2} = 0 \quad (31)$$

a

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu \cdot J_z \quad (32)$$

Na čtvercové síti s uzly 0, 1, 2, 3, 4 podle Obr. 4.11 platí následující rovnice pro uzlové potenciály pro všechny vnitřní uzly sítě:

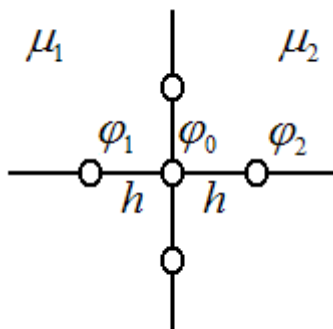
$$4\varphi_0 - \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4 = 0 \quad (33)$$

Rovnice je řešením dvou předchozích diferenciálních rovnic pomocí metody konečných diferencí. Na hranici mezi prostředními je třeba splnit podmínku  $B_{n1} - B_{n2} = 0$ . Pro síť z Obr. 4.12 je podmínka ekvivalentní požadavku [2]:

$$\mu_1(\varphi_1 - \varphi_0)/h = \mu_2(\varphi_0 - \varphi_2)/h \quad (34)$$

nebo

$$\mu_1(\varphi_1 - \varphi_0) - \mu_2(\varphi_0 - \varphi_2) = 0 \quad (35)$$



Obr. 4.12 Síť s uzly

Prochází-li rozhraní mezi uzly sítě, vztahy mezi uzlovými hodnotami jsou složitější, špatně se programují, a proto se raději používá metoda konečných prvků [2].

#### 4.2.2 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) je v dnešní době velmi rozšířenou numerickou metodou využívanou při inženýrských výpočtech tlakových, tepelných, elektrických a magnetických polí. Její fyzikální základ tvoří věta o minimu energetického funkcionálu. K jejímu velkému uplatnění přispěl především fakt, že má velmi velké využití v praxi. I proto se dnes vyučuje na vysokých školách po celém světě.

Zatímco předchozí metoda konečných diferencí (MKD) je založena na aproximaci parciálních derivací konečnými diferencemi, vychází MKP z vhodné jednoduché aproximace hledaného řešení diferenciální rovnice. Jednoduchost aproximace spočívá v tom, že oblast  $\Omega$ , ve které hledáme řešení, rozdělíme na malé elementy – konečné prvky  $\Omega_i$ , definované uzly v rozích a na hranách prvků. Potenciál uvnitř každého prvku se aproximuje z hodnot potenciálu v uzlech co nejjednodušší aproximační funkcí, a to lineárním, kvadratickým nebo binomickým polynomem. Dosazením vybrané aproximace do diferenciální rovnice nebo její ekvivalentního výrazu vznikne zbytek, závislý na uzlových potenciálech a souřadnicích. Různými metodami minimalizace zbytku lze získat soustavy rovnic pro hledané uzlové potenciály [2].

Výpočty pomocí této metody jsou značně náročné a v dnešní době se neobejdou bez podpory výpočetní techniky a příslušného softwaru. V mém případě byl použit program ANSYS v.10.0 založený na metodě konečných prvků.

Metoda konečných prvků vychází z diferenciálního modelu.

#### 4.2.3 Diferenciální model daného problému

Diferenciální rovnice uvažovaného problému má obecný tvar [1]:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} A = J_{sc} \quad (36)$$

Kde  $J_{sc}$  je hustota proudů  $I_{sc}$  tekoucích jednotlivými vodiči. Pro jejich velikost platí:

$$\text{mod } J_{sc} = \frac{I_{sc}}{S_I} \quad (37)$$

S ohledem na skutečnost, že vektor proudové hustoty  $J_{sc}$  má pouze složku ve směru  $z_0$ , platí:

$$J_{sc} = x_0 \cdot 0 + y_0 \cdot 0 - z_0 \cdot J_{sc,z}, \text{ a následně} \quad (38)$$

$$A_{sc} = x_0 \cdot 0 + y_0 \cdot 0 - z_0 \cdot A_z(x, y) \quad (39)$$

Pro tyto proměnné platí následující diferenciální rovnice:

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu_0 \cdot J_{sc,z} \quad (40)$$

Pro průřezy jednotlivých vodičů, a rovnice:

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = 0 \quad (41)$$

Pro okolní elektricky nevodivé prostředí. Uvedené rovnice x a y, doplněné příslušnými okrajovými podmínkami lze pak řešit jak metodou konečných diferencí, tak i metodou konečných prvků.[1]

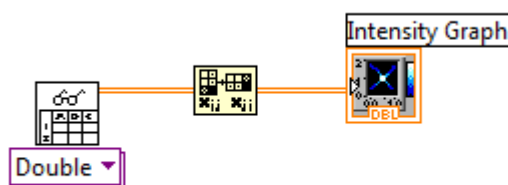
## 5 Vyhodnocení naměřených hodnot

### 5.1 Vyhodnocení naměřených hodnot pomocí programu LabView

Pro každý z proudů procházející kolejnicí při měření magnetického pole jsem nasbíral 2500-2700 hodnot, které odpovídají přibližně ploše 50 x 50 cm. Tyto hodnoty mají číselnou podobu a bylo je zapotřebí převést do podoby grafické k následnému porovnání. Pro převod těchto číselných hodnot na grafické jsem zvolil program LabView.

Vývojové prostředí LabView (z angl. Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) neboli: laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů je produktem americké firmy National Instruments. Hlavním cílem virtuální instrumentace je nahradit dočasně nebo i trvale finančně a mnohdy i časově náročné využití technických prostředků (hardware) řešením virtuálním (zdánlivým) za přispění programových prostředků (softwaru) a zejména pak grafickými a vizuálními prostředky. Firma National Instruments je průkopníkem a zároveň největším výrobcem softwaru v oblasti virtuální instrumentace, která v posledních letech zažívá veliký rozvoj jak v oblasti výzkumu, tak i školství a průmyslu. LabView je moderní programovací vývojové prostředí k vytváření programu ve formě blokových diagramů, někdy též nazývaného jako G-jazyk neboli grafický jazyk. Toto řešení umožňuje rychlé navrhování nových aplikací i provádění změn v konfiguraci, což je u realizace při použití skutečných přístrojů a materiálu často velice nákladné nebo přímo nemožné.

Velkou výhodou tohoto programu je, že obsahuje mnoho knihoven pro analýzu měřených dat. Data lze také získávat pomocí sériového nebo paralelního rozhraní a s využitím měřicích karet i z různých měřicích přístrojů. V mém případě jsem využil pouze zlomek věcí, jež tento program nabízí. Pro převod naměřených hodnot byly použity předem nastavené knihovny k analýze naměřených dat. Následující Obr. 5.1 znázorňuje řešení mého problému.



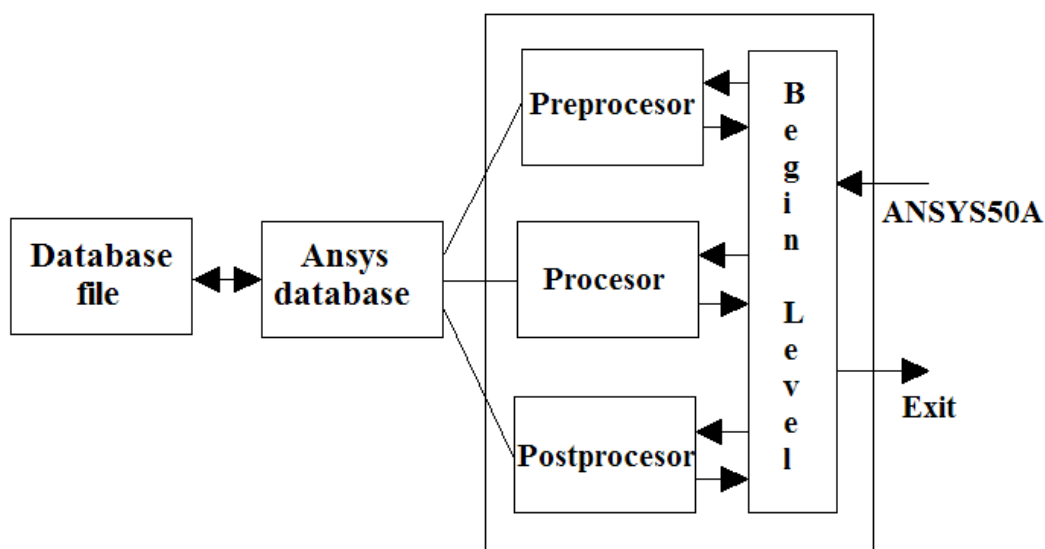
Obr. 5.1 Struktura programu LabView pro převod číselných hodnot na hodnoty grafické pomocí grafického jazyku

První člen slouží k načtení dat z tabulkového souboru a k převodu čísel na znaky. Výstupem členu je 2D pole. Dále je zapotřebí zvolit typ čísla jako Double, String nebo Integer. Druhý člen přeuspořádává prvky 2D pole tak, že 2D pole [i, j] se stane polem [j, i]. Poslední prvek Intensity Graph funguje na principu, že každé číslo v poli reprezentuje určitou barvu. Intenzitu grafu lze zobrazit až 256 barvami. Mapování barev v grafu můžeme nastavovat pomocí barevné stupnice grafu. Barevná škála se skládá z nejméně dvou libovolných značek, z nichž každá má číselnou hodnotu. Barvy grafu odpovídají číselným hodnotám načtených ze souboru.

## 5.2 Vyhodnocení vypočtených hodnot pomocí programu Ansys

Pro výpočet fyzikálních polí existuje v současné době řada velmi kvalitních programů. Většina tohoto software je velmi finančně nákladná, ale jsou i programy cenově dostupné popřípadě i zdarma na Internetu. Pro simulaci magnetického pole v okolí kolejnice jsem zvolil program ANSYS verze 10.0, který se používá při výuce na VŠB-TU Ostrava. Program využívá pro řešení předem zadaných problémů metodu konečných prvků.

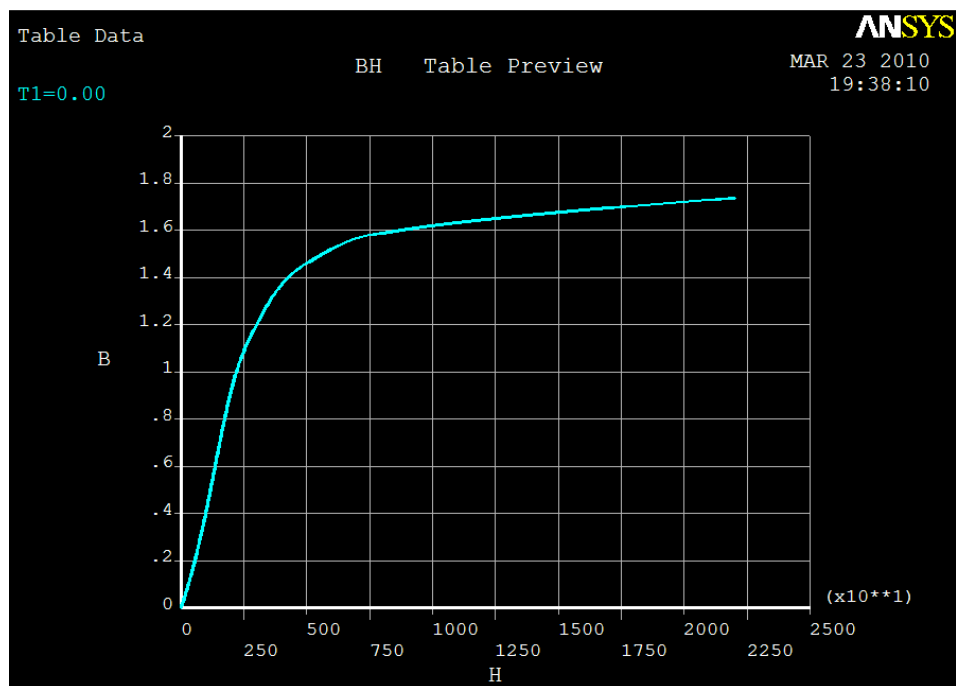
Základní verze programu umožňuje simulovat celou známou šíři fyzikálních problémů, popsatelných metodou konečných prvků jako například: strukturální analýzu (statika a dynamika), teplo, proudění, nízkou a vysokofrekvenční elektromagnetismus a to vše v jednom programovém prostředí. Stěžejní výhoda ANSYSu spočívá v jeho schopnosti tato fyzikální pole mezi sebou vzájemně kombinovat. Jedná se o program obecně nelineární a nestacionární, je možné zadávat veličiny jak skalární, tak vektorové povahy. Blokové schéma programu ANSYS verze 10.0 je shodné s blokovým schématem verze 5.0 (Obr. 5.2).



Obr. 5.2 Blokové schéma programu ANSYS

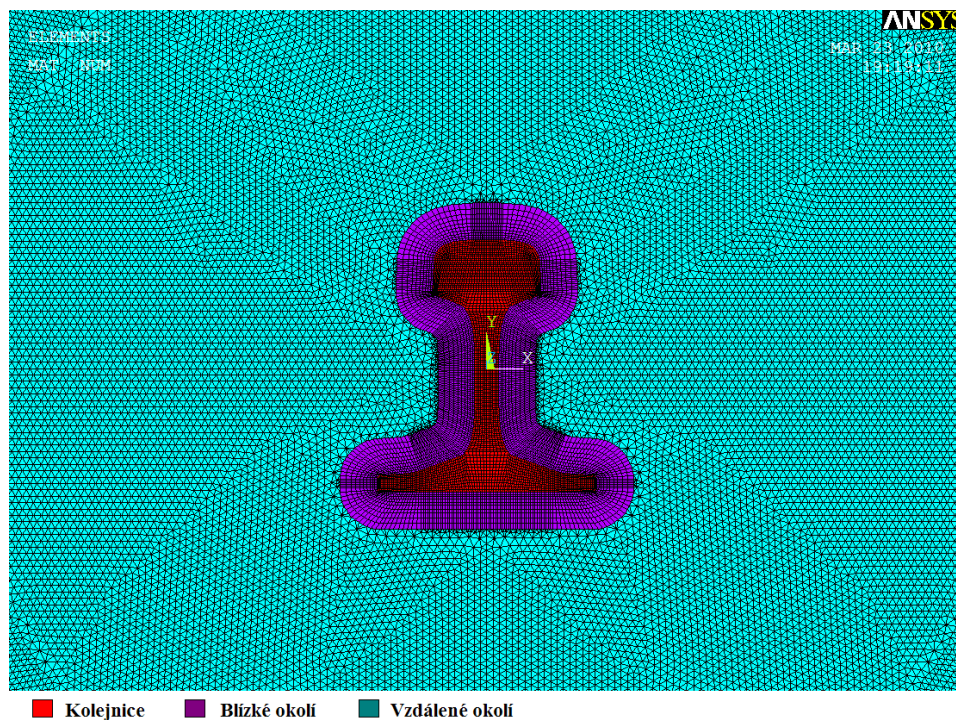
Toto schéma slouží k pochopení funkce programu a pochopení vazeb mezi třemi základními částmi programu, mezi které patří:

- 1) Preprocesor - v preprocesoru dochází k vytváření daného modelu spolu se zadáním jeho geometrických rozměrů. Dále je zde zapotřebí zadat materiálové vlastnosti (BH charakteristika, plocha průřezu kolejnice, proud a proudová hustota). Následující Obr. 5.3 znázorňuje zadanou BH charakteristiku materiálu měřené kolejnice, která byla naměřena pomocí systému Remagraph a následně tyto hodnoty byly zadány do programu ANSYS.



Obr. 5.3 BH charakteristika

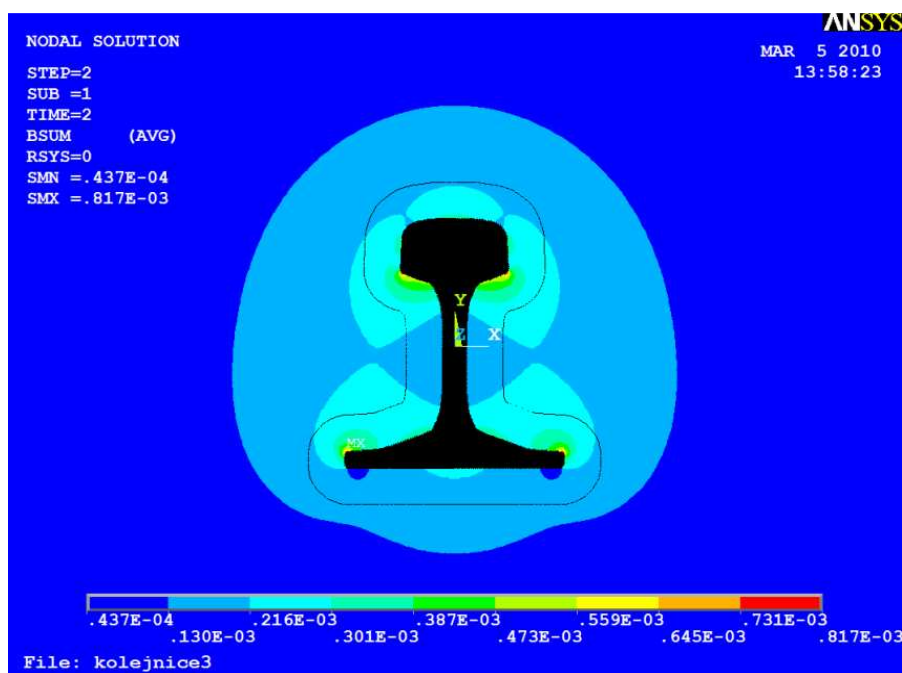
Model vytvořené kolejnice je znázorněn na Obr. 5.4.



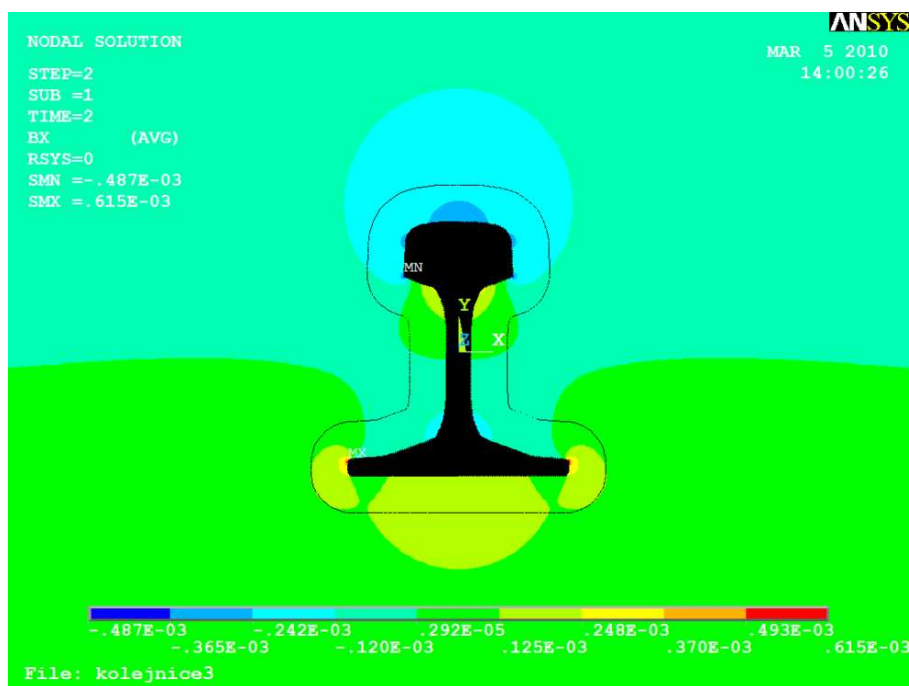
Obr. 5.4 Kolejnice a její okolí

- 2) Procesor - v procesoru je nutno zadat zatížení, okrajové podmínky a zvolit zda se jedná o statickou, harmonickou popřípadě transientní analýzu.
- 3) Postprocesor - slouží k provedení vyhodnocení řešené úlohy a následné analýze a prezentaci výsledků. Výsledky bývají zobrazovány pomocí mapy elektromagnetického pole. Pro

ukázku následující obrázky znázorňují magnetické pole v okolí kolejnice při průchodu proudem 100A. První obrázek (Obr. 5.5) znázorňuje celé magnetické pole (součin vektorů  $B_x$  a  $B_y$ ), následující obrázky pak znázorňují složku  $B_x$  (Obr. 5.6) a složku  $B_y$  (Obr. 5.7).

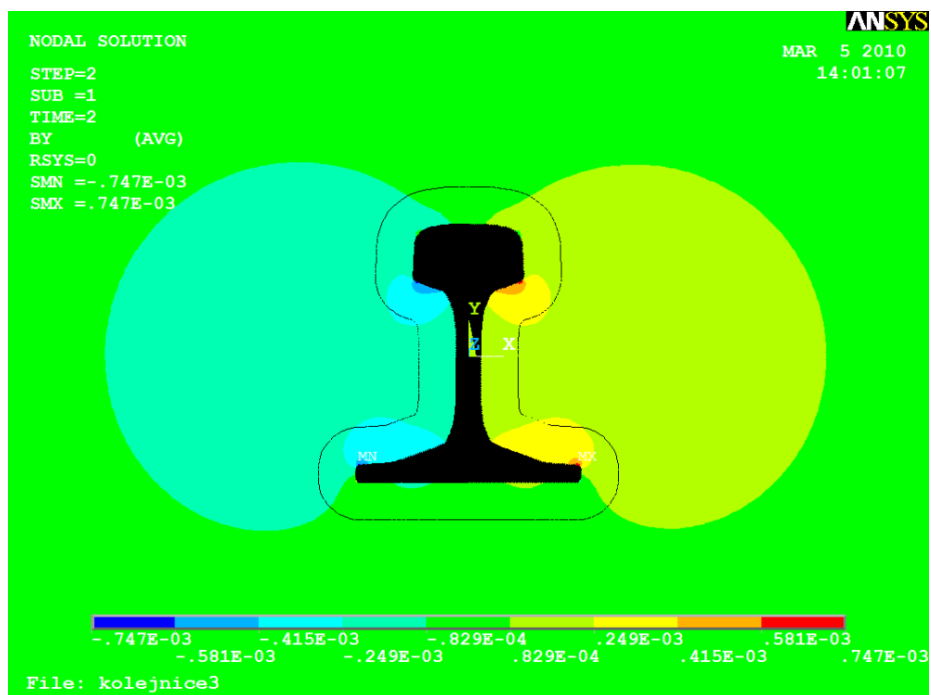


Obr. 5.5 Součin vektorů



Obr. 5.6 Složka  $B_x$



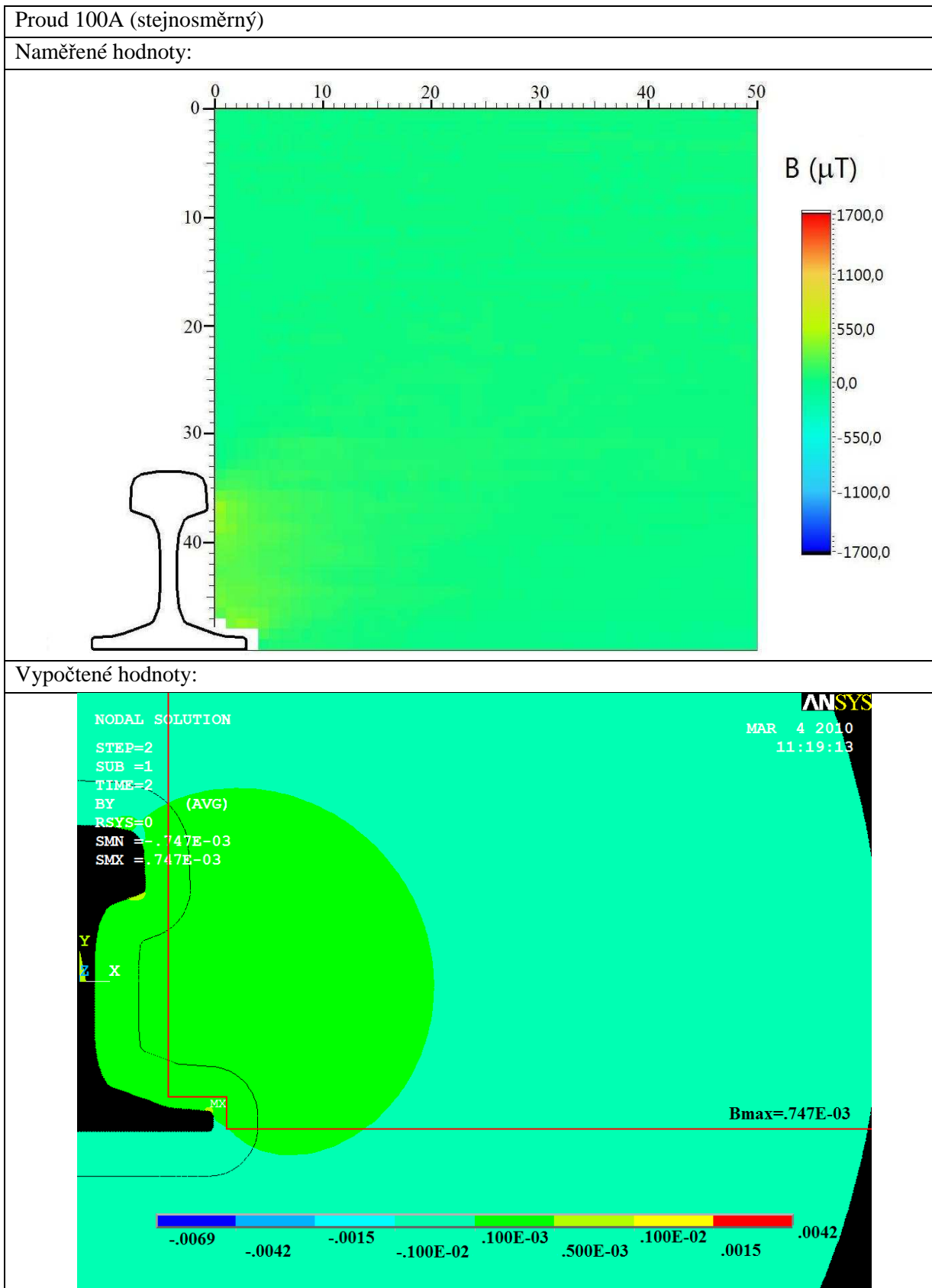


Obr. 5.7 Složka By

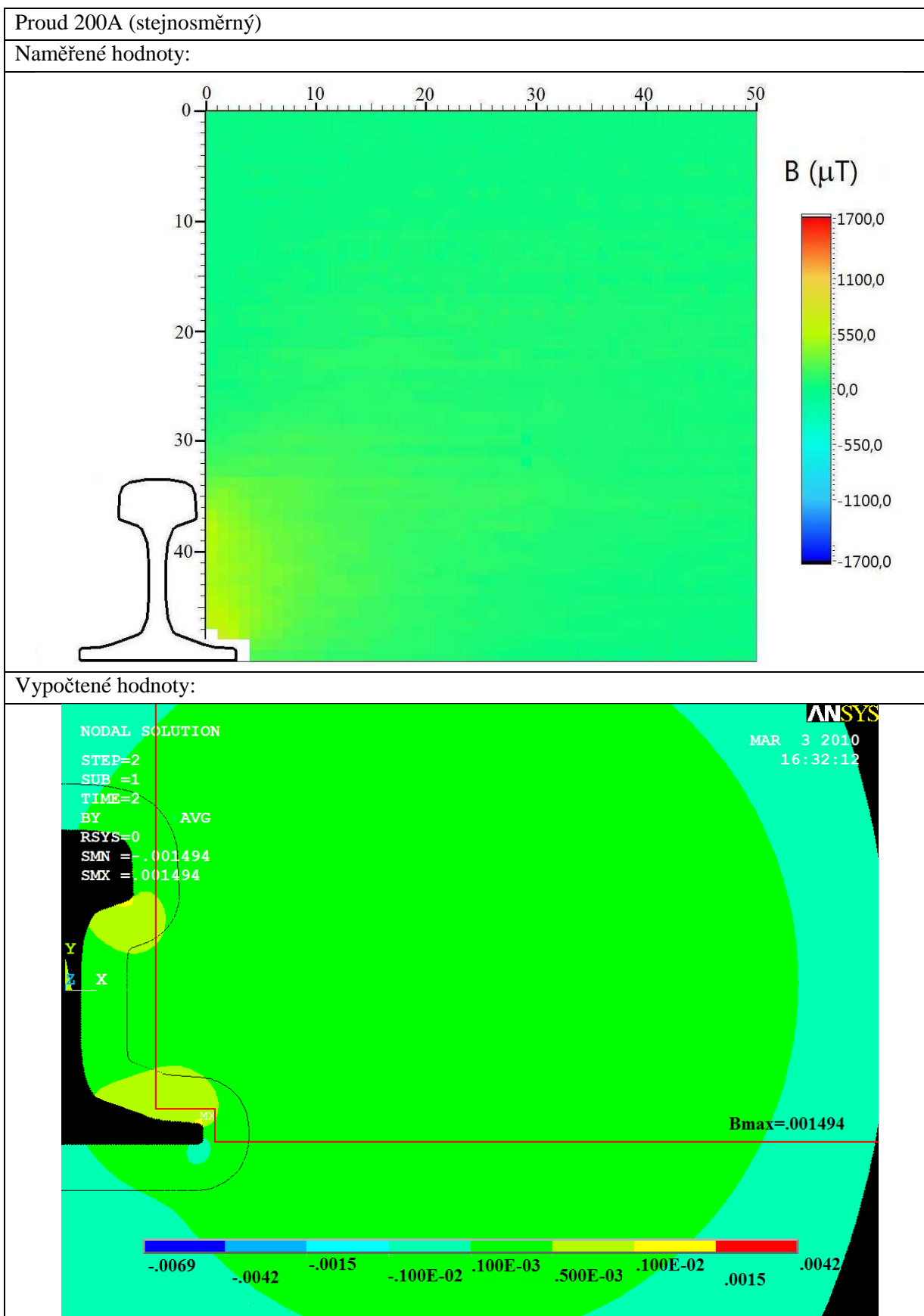
Dalším velmi dobrým doplňkem programu ANSYS je modul AWE neboli ANSYS Workbench Environment, sloužící k obousměrnému propojení libovolného programu ANSYS s CAD systémy. Jedná se o nové uživatelské prostředí zavedené v programech ANSYS od verze 7.0. Program ANSYS byl vyvinut v šedesátých letech minulého století a patří od počátku existence FEM inženýrských systémů ke špičkovým software této kategorie. Výhodou moderních výpočetních metod FEM je, že s jejich použitím lze velmi dobře vypočítat magnetické pole i u složitých geometrických objektů. ANSYS byl od počátku průkopník multifyzikálních analýz s vedoucí pozicí ve strojírenství, automobilové technice, dopravní technice přes energetiku až po stavební aplikace. V posledních letech se zaměřuje i na obory jako je mikroelektronika a biomechanika. Tento program se řadí na vedoucí pozici v předních průmyslových státech světa a hojného využití našel i na předních univerzitách EU.

## 5.3 porovnání naměřených a vypočtených hodnot

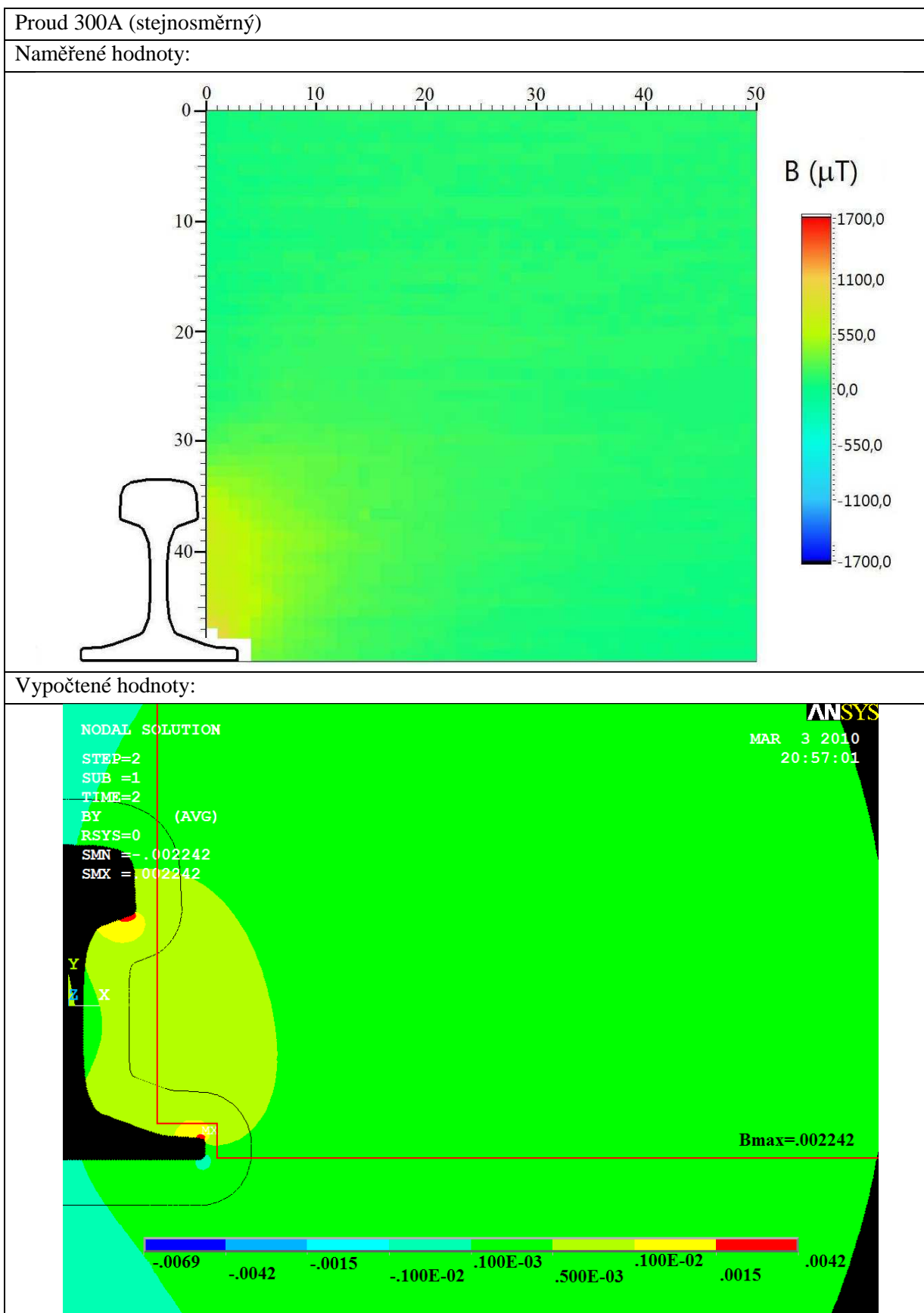
### 5.3.1 Porovnání hodnot pro proud 100A



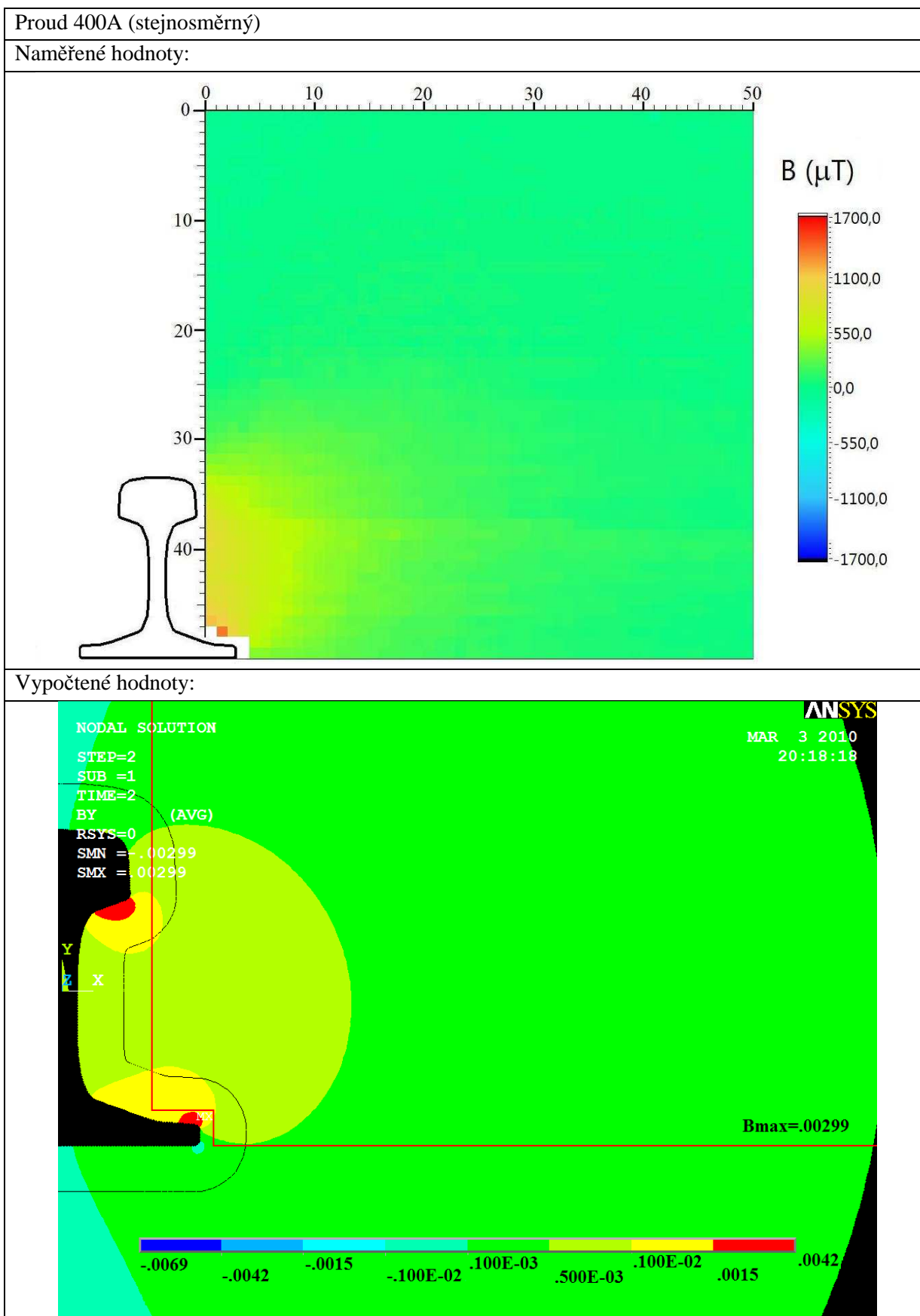
### 5.3.2 Porovnání hodnot pro proud 200A



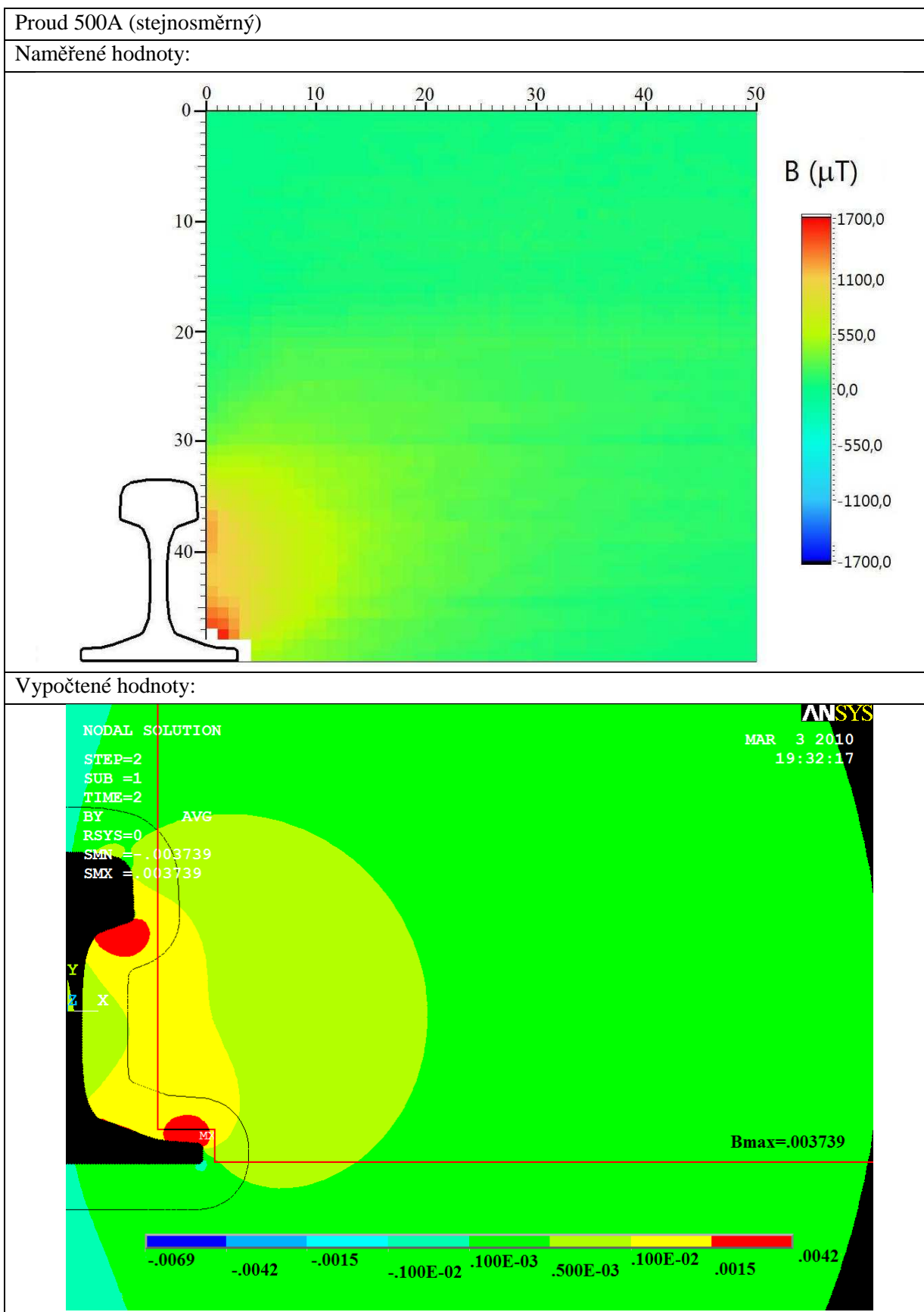
### 5.3.3 Porovnání hodnot pro proud 300A



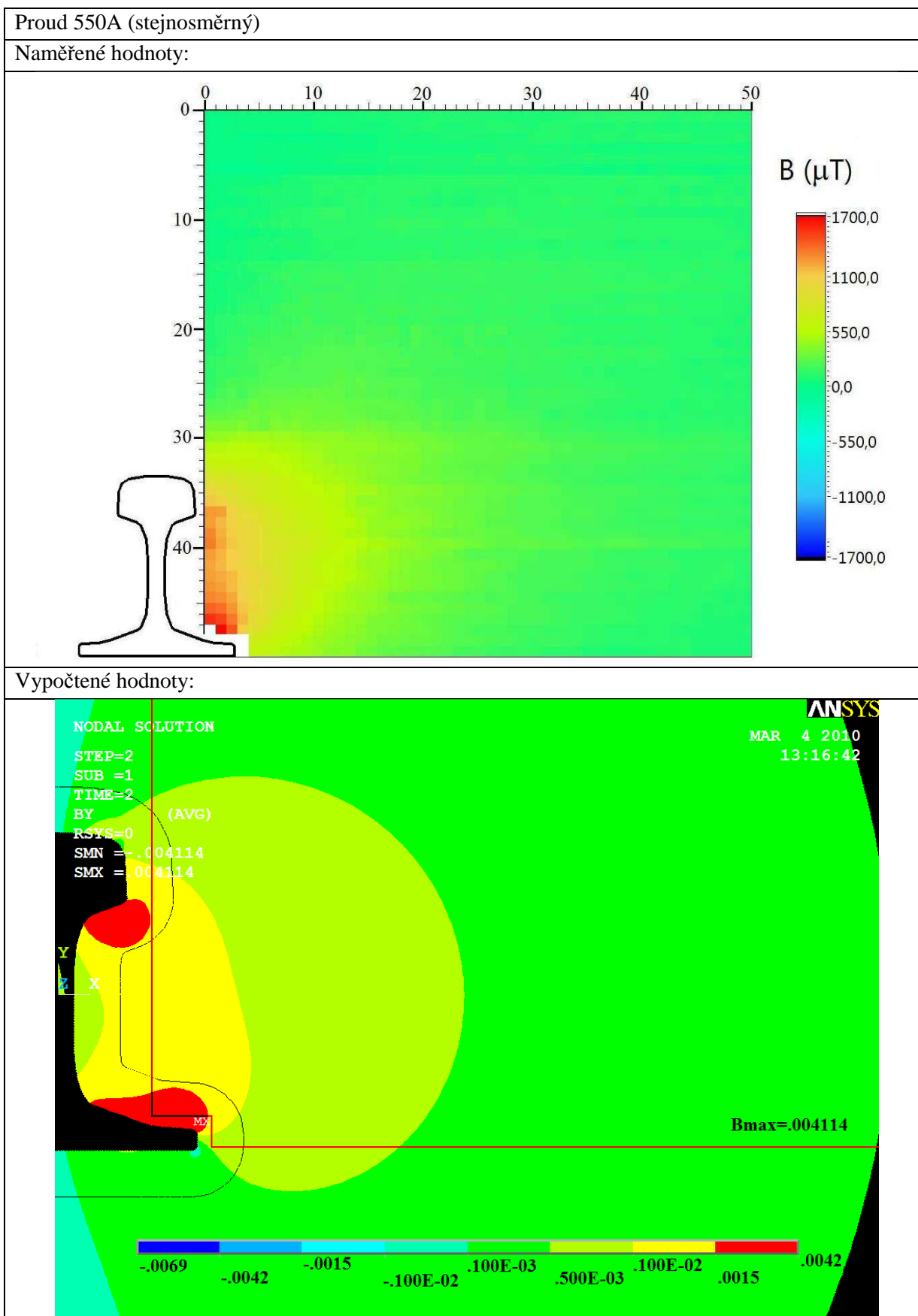
### 5.3.4 Porovnání hodnot pro proud 400A



### 5.3.5 Porovnání hodnot pro proud 500A



### 5.3.6 Porovnání hodnot pro proud 550A



## 5.4 Zhodnocení měření

Pro vyhodnocení naměřených hodnot byl použit program LabView, pomocí kterého jsem převl číselné hodnoty do grafické podoby. Aby bylo pouhým okem vidět, jak se magnetické pole mění (zvětšuje) se zvyšujícím se proudem, bylo zapotřebí stanovit jednotný interval hodnot, ve kterém se bude magnetické pole zobrazovat. Maximální hodnota tohoto intervalu činí  $1700 \mu\text{T}$ . Tato hodnota odpovídá maximální hodnotě magnetické indukce při průchodu proudem kolejnicí o hodnotě  $550\text{A}$ . Samozřejmě, že se snižujícím se proudem klesá i maximální hodnota magnetické indukce a při průchodu proudem  $100\text{A}$  kolejnicí se tato hodnota pohybuje v okolí hodnot  $300 \mu\text{T}$ . Interval musí být u všech proudů stejný, abychom mohli pozorovat změny magnetického pole, v našem případě změnu barev.

V dalším kroku bylo zapotřebí tyto naměřené hodnoty ověřit. Za tímto účelem byl použit program ANSYS, který je schopen s velkou přesností namodelovat námi zadané pole v okolí kolejnice. Program je založen na metodě konečných prvků a patří mezi jeden z nejlepších programů, co se týče modelování a to nejen magnetických polí. Při analýze magnetického pole pomocí tohoto programu je opět volen jednotný interval tentokrát s maximální hodnotou  $4200 \mu\text{T}$ . Interval musí být opět konstantní z důvodu pozorování změn magnetického pole.

Na první pohled se může zdát, že jsou hodnoty velmi odlišné, jelikož naměřená maximální hodnota odpovídá  $1700 \mu\text{T}$  a vypočtená maximální hodnota je  $4114 \mu\text{T}$ . Vysvětlení je jednoduché, program ANSYS vypočítává pole již od samotného povrchu kolejnice, zatímco měření probíhalo ve vzdálenosti přibližně  $1,5$  centimetru od paty kolejnice. Musíme brát v úvahu, že změna magnetické indukce neboli celého magnetického pole se nemění lineárně v závislosti na vzdálenosti. Tuto změnu hodnot můžeme přirovnat k např. exponenciální funkci, kdy na hraně kolejnice je hodnota  $4114 \mu\text{T}$ , ale ve vzdálenosti  $1,5\text{ cm}$  od kolejnice je hodnota  $1,7 \mu\text{T}$  a ve vzdálenosti  $15\text{ cm}$  se pohybujeme na hodnotách přibližně  $300 \mu\text{T}$  (bráno pro max. hodnotu proudem  $550\text{A}$ ). Z tohoto jednoznačně vyplývá daná nelinearita, se kterou musíme počítat při porovnávání naměřených a vypočtených výsledků. Z tohoto důvodu jsem u všech vytvořených obrázků z programu ANSYS vložil dvě červené čáry vyznačující oblast, ve které probíhalo měření. Díky této úpravě můžeme snadněji porovnat naměřené a vypočtené hodnoty. Při porovnání zjistíme, že hodnoty se liší minimálně, což je velmi dobré. Z toho vyplývá, že měření jsou velmi přesná a na druhou stranu jsem si mohl ověřit velmi dobrou funkčnost programu ANSYS. Menší odchylky jsou způsobeny jednak nastavením programu ANSYS, ale také chybou měření a chybou metody.

Ve finále musím konstatovat, že hodnoty se rozcházejí minimálně, tvar a velikost magnetického pole je shodná, až na menší výjimky jak u naměřených, tak i u vypočtených hodnot.

## 5.5 Vliv magnetického pole na člověka

### 5.5.1 Účinky magnetického pole na lidský organizmus

Elektromagnetické pole (EMP) a jeho vliv na lidský organizmus se snaží dokázat spousta vědců a různých světových zdravotnických organizací. V následujícím textu je popis vlivu magnetického pole na lidský organizmus převzaté z literatury [1]:

Magnetická pole různého původu a intenzity jsou stálou součástí životního prostředí člověka. Magnetické pole může být stálé nebo proměnné, vznikající především v okolí vodičů, kterými prochá-



zí elektrický proud. Magnetické pole působí na jiná pole silovými účinky. Identifikace účinků magnetického pole nebo magnetických polí malých intenzit je velmi nesnadná, protože působí v komplexu různých sil a vlivů s výraznějším biologickým účinkem. Fyzikální předpoklady pro biologický účinek jsou dány charakterem biologických objektů. Jsou to nehomogenní dielektrické systémy zčásti s elektrolytickou vodivostí, ve kterých probíhají složité biochemické pochody. Druhým významným faktorem je vznik bioelektrických potenciálů a vedení bioelektrických impulzů nervovými vlákny a jinými strukturami. Třetí charakteristikou důležitou pro uplatnění vlivů magnetizmu je neustálé proudění krve a jiných tekutin.

V organismu jsou přítomny převážně diamagnetické látky a slabě látky paramagnetické. Zejména u diamagnetických molekul se může změnit orientace a koncentrace, což má za následek změny kinetiky biochemických reakcí a dalších fyzikálněchemických pochodů.

Podle charakteru magnetického pole může dojít k velmi různorodému účinku na nervovou tkáň. Experimentální údaje nasvědčují tomu, že stálé magnetické pole snižuje a nízkofrekvenční proměnné magnetické pole zvyšuje dráždivost nervových struktur vlivem interakce změn magnetického pole s biopotenciály.

U trubic většího průměru, ve kterých laminárně proudí kapalina, se působením magnetického pole zpomalí průtok. Účinek silných magnetických polí je nesporný, byly popsány i smrtelné účinky stálého elektrického pole u mladých myší. U lidí pracujících v magnetických polích o velké intenzitě byly pozorovány změny reakční doby, snížení kožního odporu, změny sedimentace erytrocytů a jiné nespecifické účinky. Nejvíce projevů je ve sféře vegetativní.

Nehomogenní nízkofrekvenční magnetické pole se používá i léčebně při degenerativních onemocněních kloubů, u otoků u distorzních kloubů, při parézách periferních nervů, při bérceových vředech i u jiných zánětlivých a degenerativních onemocněních. Používá se polí o intenzitě kolem  $4 \cdot 10^3 \text{ Am}^{-1}$  s magnetickým gradientem do  $5 \text{ mT} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Mechanismus účinku není zatím plně objasněn, již samo přesné určení intenzity magnetických polí je metodicky velmi obtížné. Biologické účinky vysokofrekvenčních magnetických polí jsou založeny na mechanismu přeměny v tepelnou energii.

### 5.5.2 Maximální typické expozice obyvatelstva EMP dle světové zdravotnické organizace WHO

Tab. 5.1 Typické maximální expozice obyvatelstva z běžných zdrojů

Zdroj	Druh pole	Typická maximální expozice
Přirozená pole	Statické magnetické pole	70 $\mu\text{T}$
	Statické elektrické pole	200V/m
Elektrická vedení	Magnetické pole	200 nT (uvnitř domů)
	Magnetické pole	200 $\mu\text{T}$ (pod vedením VN)
	Elektrické pole	100V/m (v domácnostech)
	Elektrické pole	10 kV/m (pod vedením VN)
Elektrické vlaky a tramvaje	Magnetické pole	50 $\mu\text{T}$
	Elektrické pole	300 V/m

Vliv magnetického pole na zdraví lidí [1]:

- 1) Všeobecný účinek na zdraví – spadá sem řada symptomů a poruch zdravotního stavu od bolesti hlavy, úzkostných stavů, zvracení, depresí. Podle uvedených studií v žádném z těchto případů nebyl vztah k expozici EMP prokázán.
- 2) Účinek na průběh těhotenství a jeho výsledek – studie zde rovněž uzavírá, že expozice EMP nemá v uvedené oblasti negativní důsledky.
- 3) Rovněž nebyl potvrzen vliv EMP na zrak a vznik šedého zákalu.
- 4) Navzdory četným pracím jsou zatím rozporuplné výsledky, týkající se vlivu EMP na zvýšení rizika a vznik rakoviny.
- 5) Z ostatních biologických účinků bylo popsáno pouze několik krátce trvajících psychologických poruch spojených s expozicí vlivům silných EMP (mT).

## 6 Závěr

Ve své diplomové práci jsem úspěšně naměřil a porovnal pomocí výpočtu velikost magnetického pole v okolí kolejnice při průchodu proudů o hodnotách 100A, 200A, 300A, 400A, 500A a 550A dle zadání.

Pro vyhodnocení naměřených hodnot byl použit program LabView, pomocí kterého jsem převl číselné hodnoty do grafické podoby. Aby bylo pouhým okem vidět, jak se magnetické pole mění (zvětšuje) se zvyšujícím se proudem, bylo zapotřebí stanovit jednotný interval hodnot, ve kterém se bude magnetické pole zobrazovat. V dalším kroku bylo zapotřebí tyto naměřené hodnoty ověřit. Za tímto účelem byl použit program ANSYS 10.0, který je schopen s velkou přesností namodelovat námi zadané pole v okolí kolejnice. Program ANSYS byl vyvinut v šedesátých letech minulého století a patří od počátku existence FEM inženýrských systémů ke špičkovým software této kategorie. Je založený na metodě konečných prvků, k jejímuž velkému uplatnění přispěl především fakt, že má velmi velké využití v praxi. I proto se dnes vyučuje na vysokých školách po celém světě.

Měření probíhalo v laboratoři magnetických měření v areálu VŠB-TU Ostrava bez problémů přibližně do hodnoty 300A stejnosměrného proudu. Od této hodnoty začaly problémy především s přehříváním zdroje, vznikem přechodných odporů, tavení izolace napájecích kabelů a dalších věcí, které by mohly nepříznivě ovlivnit naměřené výsledky. Tyto problémy se mi postupně s jejich výskytem podařilo eliminovat a mohu konstatovat, že až na určitou chybu měření a chybu metody, která se bude vyskytovat při každém měření, jsou výsledky velmi přesné. Přesnost těchto výsledků shrnuje kapitola č. 5, ve které jde vidět pouhým okem, že naměřené hodnoty se od vypočtených téměř neliší.

Měření probíhalo od vzdálenosti 1,5 cm od paty kolejnice a při průchodu nejnižšího proudu 100A zde byla naměřena hodnota 300  $\mu\text{T}$ . Naopak u nejvyššího proudu 550A byla zjištěna hodnota 1700  $\mu\text{T}$ . Při použití výpočetního systému ANSYS jsem zjistil, že hodnota přímo na okraji paty kolejnice má hodnotu 4114  $\mu\text{T}$ .

Přínosem této diplomové práce je především zjištění intenzity magnetického pole a namodelování skutečného magnetického pole v okolí kolejnice. Z těchto poznatků, především velikosti intenzity a chování pole, můžou data sloužit k doplnění norem limitujících intenzitu magnetických polí a délku pobytu v nich.

Magnetickému poli se v posledních letech věnuje velká pozornost, a to především v oblasti vlivu na lidský organizmus a životní prostředí. Spoustu vědců i světových zdravotnických organizací se snaží zjistit, jak moc magnetické pole škodí, popřípadě zda způsobuje nemoci a jiné vady. Zatím nebylo jednoznačně prokázáno škodlivosti vlivu na lidský organizmus, a proto jako další rozšíření této práce by mohlo být zjištění vlivu magnetického pole na živé organizmy vyskytující se nebo žijící v okolí kolejnic.

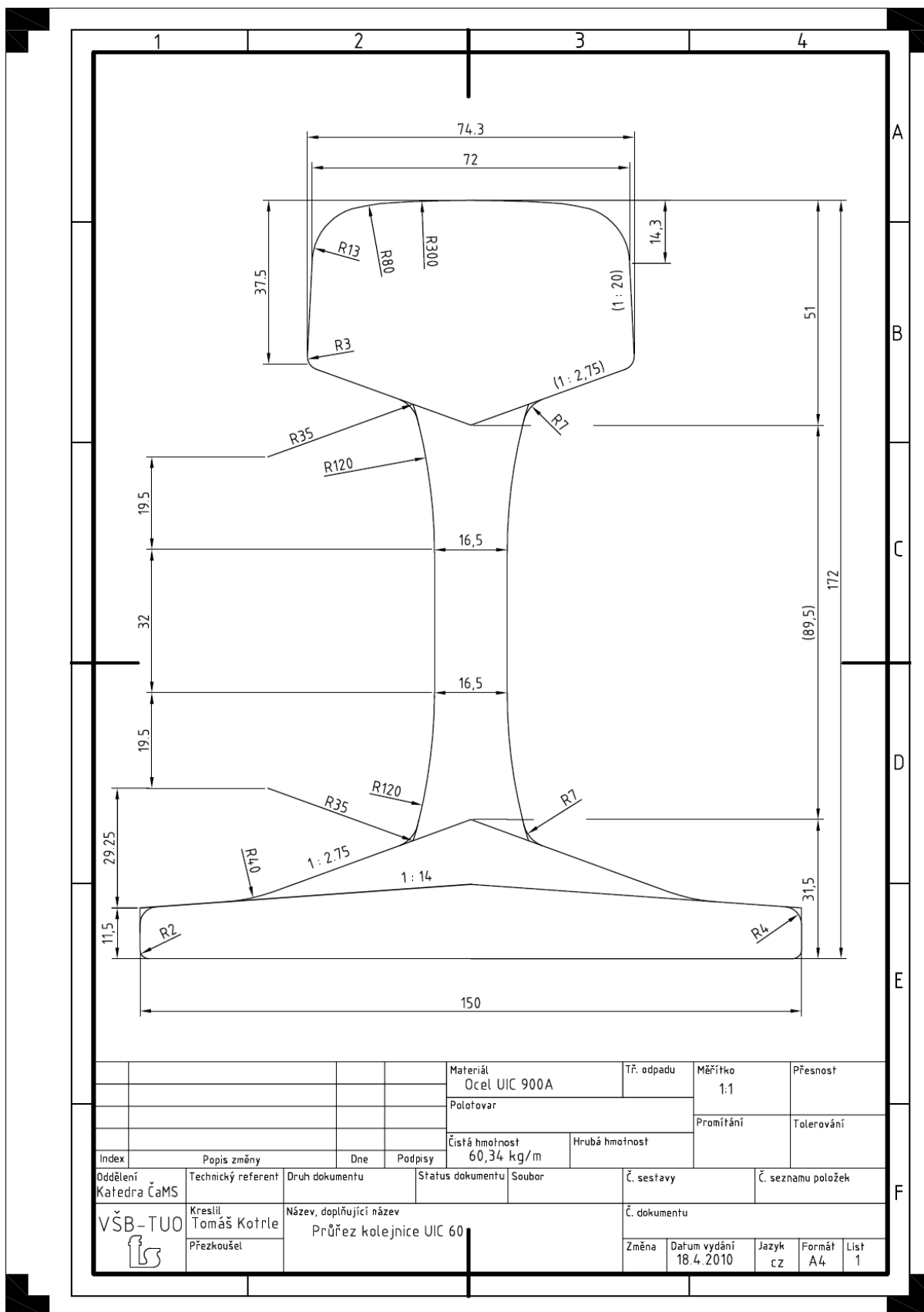
## 7 Použitá literatura

- [1] Paleček, J. a kol.: Vliv elektrické vozby na životní prostředí, závěrečná zpráva projektu GAČR 103/05/0660, VŠB-TU Ostrava 2008
- [2] Dědek, L.: Teorie elektromagnetického pole, Brno, VUT 1990
- [3] Draxler, K.; Kašpar, P.; Ripka, P.: Magnetické prvky a měření, Praha, ČVUT 1999
- [4] Henzl, C.; Paleček, J.: Analytical Calculation of the Magnetic Field in the Vicinity of a DC Electric Railway. Sborník mezinárodní konference Advcent Methods in The Theory of Electrical Engineering, str. 25 až 28, Plzeň 12. Až 14. 9. 2005 ISBN 80-7043-392-2
- [5] Katalogový list přístroje Gauss/Tesla metr Bell série 5100 model 5180  
<http://www.fwbell.com/filemanager/library/5100%20datasheet.pdf>
- [6] Katalogový list přístroje Jackle G550 S  
<http://www.jaeckle-sst.de/de/produkte/gleichrichter/g-250s-400s-550s-700s.php>
- [7] Internetová encyklopedie  
<http://cs.wikipedia.org>
- [8] Www stránky laboratoře magnetických měření, VŠB-TU Ostrava  
<http://feil.vsb.cz/kat453>
- [9] Www stránky Třineckých železáren (výrobce kolejnice)  
[www.trz.cz](http://www.trz.cz)

## **8      Seznam příloh**

<b>Příloha I – Výkres kolejnice .....</b>	<b>2</b>
<b>Příloha II – Tabulky naměřených hodnot.....</b>	<b>3</b>

## Příloha I – Výkres kolejnice



### Příloha III – Tabulky naměřených hodnot \*

(\* Pozn. Z důvodu rozsáhlosti a velikosti jsou tabulky pouze v elektronické podobě na přiloženém CD)